Общероссийская общественная организация
«Российская инженерная академия» (РИА)

Кубанское региональное отделение Общероссийской общественной организации «Российская инженерная академия» (КО РИА)

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»

Министерство промышленной политики Краснодарского края

Департамент строительства Краснодарского края

союз «Саморегулируемая организация
«Межрегиональный альянс строителей»

Ассоциация «Железобетон»

Мероприятие приурочено к 90-летию Президента Российской инженерной академии, доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента РАН Гусева Б.В.

СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы IV Международной
научно-практической конференции
(24 сентября 2026 г.)

Краснодар
2026

УДК 691.32
ББК 38.33
С56

С56 **СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ** : Материалы IV Международной научно-практической конференции (24 сентября 2026 г.) / Российская инженерная академия, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2026. – 330 с.

ISBN 978-5-91718-816-4

Сборник содержит материалы IV Международной научно-практической конференции «Современные бетоны и технологии: проблемы, решения, перспективы», проведенной в г. Краснодаре 24 сентября 2026 года. Мероприятие приурочено к 90-летию Президента Российской инженерной академии, доктора технических наук, профессора, члена-корреспондента РАН Гусева Б.В.

В настоящем издании представлены результаты исследований в области товарных бетонных смесей и монолитного бетонирования, производства бетонных и железобетонных изделий, ресурсосберегающих технологий и использование вторичного сырья, контроля качества, испытания и диагностики бетонных изделий и конструкций, особенностей нормативного регулирования, сырья и компонентов в технологии бетона.

Опубликованные материалы могут быть полезны научно-педагогическим кадрам, экспертам, специалистам индустрии строительных материалов и стройкомплекса России и зарубежья, а также другим научным работникам, практикубщим специалистам и учащимся.

ББК 38.33
УДК 691.32

ISBN 978-5-91718-816-4

© Коллектив авторов, 2026
© Российская инженерная академия, 2026
© ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»
© Оформление: ООО «Издательский Дом – Юг», 2026

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ:

Председатель –

Нековаль Светлана Николаевна – проректор по научной работе и инновациям ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», кандидат биологических наук, г. Краснодар, Россия

Сопредседатель –

Гусев Борис Владимирович – Президент Общероссийской общественной организации «Российская инженерная академия», доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, г. Москва. Россия.

Заместители председателя:

Соловьева Екатерина Владимировна – и.о. декана факультета архитектуры, строительства и автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», доктор экономических наук, профессор, г. Краснодар, Россия.

Иванов Леонид Алексеевич – доктор информационных технологий, первый вице-президент и главный ученый секретарь Российской инженерной академии, действительный член РИА, г. Москва, Россия.

Фаликман Вячеслав Рувимович – доктор материаловедения, член Президиума Российской инженерной академии (г. Москва, Россия).

Удодов Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, член президиума Российской инженерной академии, руководитель Кубанского регионального отделения, доцент кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия.

Члены оргкомитета:

Данько Владислав Павлович – кандидат технических наук, доцент, и.о. заведующего кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», член-корреспондент Российской инженерной академии, г. Краснодар, Россия.

Хасан Йылдырым – доктор философии (Ph.D), доцент факультета гражданского строительства, отделение строительных материалов, Стамбульский технический университет, г. Стамбул, Турция.

Мамедов Кямран Н. – начальник управления технологии бетона AKKUYUTSRST İNŞAAT VE TEST LABORATUVARI SANAYİ TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ, соискатель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова Кубанского государственного технологического университета, г. Силифке, Турция.

Зобкова Аделаида Станиславовна – заместитель декана факультета архитектуры, строительства и автомобильных дорог ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия.

Секретарь:

Самандасюк Глеб Витальевич – ассистент кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар, Россия.

ОГЛАВЛЕНИЕ / CONTENTS

Афанасьева Я.В., **Спиридонов Д.А.**, **Хао Юйхан**
Использование вторичных ресурсов при производстве бетонов 13

Afanasieva Ya.V., **Spiridonov D.A.**, **Hao Yuhang**
The use of secondary resources in concrete production

Бабич А.С., Усанов С.В.
Генеративный дизайн и оптимизация сечений несущих конструкций:
снижение материалоемкости без потери надежности 18

Usanov S.V., **Babich A.S.**
Generative design and optimization
of cross-sections of bearing structures:
reducing material intensity without losing reliability

Бабич А.С., Усанов С.В.
Автоматизированное обследование фасадов
с помощью машинного зрения и БПЛА:
от распознавания трещин до категории аварийности 21

Usanov S.V., **Babich A.S.**
Automated examination of facades using machine vision and UAVS:
from crack recognition to emergency category

Баранова П.С., **Усанов С.В.**
Воздействие различных видов кислот
на железобетонных конструкции 25

Baranova P.S., **Usanov S.V.**
Effect of various types of acids on reinforced concrete structures

Баранова П.С., **Усанов С.В.**
Влияние динамических нагрузок на бетон 30

Baranova P.S., **Usanov S.V.**
Effect of dynamic loads on concrete

Баранова П.С., **Усанов С.В.**
О подходе к моделированию высокопрочного бетона 35

Baranova P.S., **Usanov S.V.**
On the approach to modeling high-strength concrete

Баранова П.С., **Усанов С.В.**
Влияние высоты падения груза
на продавливание безбалочных перекрытий 40

Baranova P.S., **Usanov S.V.**
Influence of drop height on punching shear of flat slabs

Богомолов О.В., **Кузин В.Ф.**, **Малышев А.А.**
Исследование путей повышения энергоэффективности
теплоснабжения производства железобетонных изделий
и сооружений жилищно-коммунального комплекса 45

Bogomolov O.V., **Kuzin V.F.**, **Malyshev A.A.**
Research into ways to improve the energy efficiency
of heat supply in the production of reinforced concrete products
and structures of the housing and utilities sector

Брагин В.И., **Дубиненко Н.А.**, **Карнаушенко А.А.**
Влияние промышленных предприятий
на становление архитектурно-планировочного облика
Краснодара в советский период 50

Bragin V.I., **Dubinenko N.A.**, **Karnaushenko A.A.**
The influence of industrial enterprises on the formation
of the architectural and planning appearance
of Krasnodar during the Soviet period

Брагин В.И., **Дубиненко Н.А.**
Территории в пойменной зоне Старой Кубани:
перспективы для градостроительства 57

Bragin V.I., **Dubinenko N.A.**
Territories in the floodplain zone of the Old Kuban:
prospects for urban development

Булгаков А.Г., **Хольшемахер К.**, **Асеев В.Ю.**, **Шлеенко А.В.**
Технология строительного процесса реконструкции
и усиления строительных сооружений с помощью
армированных базальтовой арматурой бетонных плит 64

Bulgakov A.G., **Holschemacher K.**, **Aseev V.Yu.**, **Shleenko A.V.**
Technology for the construction process of reconstruction
and strengthening of building structures
using concrete slabs reinforced with basalt reinforcement

Буракова М.М., **Усанов С.В.**
Применение ультразвукового метода
для оценки зоны повреждения железобетона после пожара 71

Burakova M.M., **Usanov S.V.**
Use of ultrasound method for assessing
the reinforced concrete damage zone after a fire

Буракова М.М., **Усанов С.В.**
Использование искусственного интеллекта
для оптимизации армирования и прогнозирования долговечности 76

Burakova M.M., **Usanov S.V.**
Use of artificial intelligence for reinforcement optimization
and durability prediction

Буракова М.М., **Усанов С.В.**
Применение низкоуглеродного бетона в инфраструктурных проектах:
мосты, тоннели, аэродромы 81

Burakova M.M., **Usanov S.V.**
Use of low-carbon concrete in infrastructure projects:
bridges, tunnels, and airports

Буракова М.М., **Усанов С.В.**
Демонтаж или снос: технологии разборки зданий
с максимальным возвратом бетона в оборот 85

Burakova M.M., **Usanov S.V.**
Demolition or deconstruction:
technologies for building dismantling with maximum concrete recovery

Выпринцева В.Д., **Гулякин Д.В.**
Биосферно-совместимое строительство
как новая парадигма архитектурного проектирования 89

Vyprintseva V.D., **Gulyakin D.V.**
Biosphere-compatible construction
as a new paradigm of architectural design

Выпринцева В.Д., **Гулякин Д.В.**
Нейроархитектура и городское старение:
проектирование для уязвимых групп 93

Vyprintseva V.D., **Gulyakin D.V.**
Neuroarchitecture and urban aging:
designing for vulnerable groups

Выпринцева В.Д., **Долгополов В.Е.**, **Данько В.П.**
Разработка критериев остаточного ресурса
для изгибаемых элементов с учётом накопления повреждений 97

Vyprintseva V.D., **Dolgopolov V.E.**, **Danko V.P.**
Development of residual life criteria
for flexural elements considering damage accumulation

Выпринцева В.Д., **Шестакова Е.В.**
Технологические особенности монтажа
различных типов подвесных потолков:
анализ сложности установки и требований к подготовке основания 102

Vyprintseva V.D., **Shestakova E.V.**
Technological features of installation of various types
of suspended ceilings: analysis of installation complexity
and requirements for base preparation

Галимзянов Д.В., **Кутлияров Д.Н.**
Бетоны нового поколения:
геополимеры, карбонизация, переработка отходов 106

Galimzyanov D.V., **Kutliyarov D.N.**
New generation concrete: geopolymers, carbonation, waste recycling

Голодкова М.М., **Усанов С.В.**
Примеры усиления аварийных железобетонных конструкций 110

Golodkova M.M., **Usanov S.V.**
Examples of strengthening emergency reinforced concrete structures

Голодкова М.М., **Усанов С.В.**
Влияние глобального потепления на железобетонные конструкции 114

Golodkova M.M., **Usanov S.V.**
Effect of global warming on reinforced concrete structures

Голодкова М.М., **Усанов С.В.**
Защита железобетонных изделий от коррозии
с помощью применения коллоидных систем 119

Golodkova M.M., **Usanov S.V.**
Protection of reinforced concrete products against corrosion
using colloidal systems

Горохов И.А.
Башня федерация – самый высокий небоскрёб в Москве 124

Gorokhov I.A.
The Federation Tower is the tallest skyscraper in Moscow

Жиляев А.А.
Фибробетоны с применением вторичного сырья
в современном строительстве 131

Zhilyaev A.A.
Fiber concrete using recycled materials in modern construction

Зиновьев А.А., **Булгаков Б.И.**, **Ляпидевская О.Б.**
Параметры поровой структуры как критерий
приемки вибропрессованных бетонных изделий:
от научного аппарата к нормативной практике 135

Zinoviev A.A., **Bulgakov B.I.**, **Lyapidevskaya O.B.**
Pore structure parameters as an acceptance criterion
for vibropressed concrete products:
from scientific framework to regulatory practice

Иванчук В.Р., **Усанов С.В.**
Неразрушающие методы контроля прочности бетона в конструкциях:
сопоставимость результатов и источников погрешностей 143

Ivanchuk V.R., **Usanov S.V.**
Non-destructive methods for testing concrete strength in structures:
comparability of results and sources of error

Иванчук В.Р., **Усанов С.В.**
Высокопрочные фибробетоны с полимерной и стальной фиброй:
сравнительный анализ трещиностойкости и ударной вязкости 147

Ivanchuk V.R., **Usanov S.V.**
High-strength fiber-reinforced concretes with polymer and steel fibers:
a comparative analysis of crack resistance and impact toughness

Козуб А.П., **Усанов С.В.**
Распознавание коррозионного износа
и дефектов замоноличивания опорных узлов
стропильных ферм промзданий методом компьютерного зрения 150

Kozub A.P., **Usanov S.V.**
Recognition of corrosion wear and bedding concrete defects
in support joints of industrial building roof trusses using computer vision

Кустарёв Г.В., **Данилов Р.Г.**, **Андрюхов Н.М.**
Определение оптимальных параметров автобетоносмесителей
методом анализа продолжительности рабочего процесса 153

Kustarev G.V., **Danilov R.G.**, **Andryukhov N.M.**
Determination of optimal parameters of automated concrete mixers using
the method of analyzing the duration of the work process

Лизогуб И.В., **Павлова И.П.**, **Лизогуб А.А.**
Экспериментальная оценка смесей с метакаолином
и золой-уносом для строительной 3D-печати 164

Lizogub I.V., **Pavlova I.P.**, **Lizogub A.A.**
Experimental evaluation of metakaolin-fly ash mixtures
for construction 3D printing

Несветайло В.М., **Торицын И.В.**
Теоретические и экспериментальные исследования
по созданию нового неразрушающего метода
определения прочности бетонов 167

Nesvetaylo V.M., **Toritsyn I.V.**
Theoretical and experimental research on the development
of a new non-destructive method for determining the strength of concrete

Петухова А.А., **Дубиненко Н.А.**, **Сокольская О.Н.**
Влияние планировочной трансформации русла реки Карасун
в процессе градостроительного развития города Краснодара
на климатоэкологические показатели окружающей среды 172

Petukhova A.A., **Dubinenko N.A.**, **Sokolskaya O.N.**
The impact of the planning transformation of the Karasun River channel
on the climatic and ecological indicators of the environment during
the urban development of Krasnodar

Сайдумов М.С.
Теоретические и методологические основы
получения высококачественных строительных композитов
на основе вторичного сырья 180

Saidumov M.S.
Theoretical and methodological basis for obtaining high-quality
construction composites based on secondary raw materials

Муртазаев С.А.Ю., **Сайдумов М.С.**, **Абумуслимов А.С.**
Межфазное взаимодействие
в бетонных композитах на техногенном сырье:
термодинамика, механизмы и методы управления 189

Murtazaev S.A.Yu., **Saidumov M.S.**, **Abumuslimov A.S.**
Interfacial interaction in concrete composites based
on technogenic raw materials:
thermodynamics, mechanisms and control methods

Секисов А.Н.
Организационно-экономический механизм управления
фазово-структурной конверсией рециклинговых бетонов:
предикативное моделирование
и нейроинтуитивное принятие решений 197

Sekisov A.N.
Organizational and economic mechanism for managing
phase-structural conversion of recycled concrete:
predictive modeling and neuro-intuitive decision making

Сокольская О.Н., **Ааадех Х.И.Х.**, **Дубиненко Н.А.**
Температурный баланс деятельной поверхности
городской застройки Краснодара 203

Sokolskaya O.N., **Avaadekh H.I.H.**, **Dubinenko N.A.**
Thermal field of Krasnodar urban development from landsat data:
relationship with functional zoning and building types

Сокольская О.Н., **Безгина А.С.**
Архитектурно-планировочные приемы
формирования естественной аэрации в зданиях 207

Sokolskaya O.N., **Bezgina A.S.**
Architectural and planning techniques for natural aeration in buildings

Сокольская О.Н., **Василенко С.В.**
Архитектурно-планировочные приемы формирования
благоприятных температурных и микроклиматических показателей
приземной зоны жилой застройки г. Краснодара 212

Sokolskaya O.N., **Vasilenko S.V.**
Architectural and planning techniques for the formation
of favorable temperature and microclimatic indicators
of the surface zone of residential development in Krasnodar

Сокольская О.Н., **Дроздов В.С.**
Градостроительное районирование Краснодарского края
и Республики Адыгеи с учетом природно-климатических факторов 217

Sokolskaya O.N., **Drozdov V.S.**
Urban planning landscape-climatic zoning of Krasnodar krai
and the Republic of Adygea

Сорокина Е.Н., **Маджид А.А.К.**, **Дубиненко Н.А.**
Роль материалов и соединений в обеспечении пластичности
и энергопоглощения при сейсмических воздействиях:
подбор сталей, бетонов, типов узлов 223

Sorokina E.N., **Majid A.A.K.**, **Dubinenko N.A.**
The role of materials and connections in ensuring ductility
and energy absorption under seismic loads:
selection of steels, concretes, and types of joints

Сорокина Е.Н., **Дубиненко Н.А.**, **Карнаушенко А.А.**
Оптимизация конструктивной схемы уникального здания
с учетом сейсмических и ветровых воздействий:
компромисс между архитектурной свободой и безопасностью 230

Sorokina E.N., **Dubinenko N.A.**, **Karnaushenko A.A.**
Optimizing the structural design of a unique building,
taking into account seismic and wind loads:
a compromise between architectural freedom and safety

Стурова В.А.
Возможность и перспективы применения вторичного сырья
промышленного производства в строительстве 240

Sturova V.A.
Feasibility and prospects
of using industrial secondary raw materials in construction

Сулейманова Л.А., **Кравченко Д.Э.**
Влияние светоотражающего компонента
на яркость и длительность послесвечения светящегося бетона 245

Suleymanova L.A., **Kravchenko D.E.**
The influence of a reflective component on the brightness
and duration of afterglow of luminous concrete

Сулейманова Л.А., **Рябчевский И.С.**, **Се Ди**
Исследование влияния материала кладочного шва
на паропроницаемость ограждающих конструкций
из ячеистобетонных блоков 249

Suleymanova L.A., **Ryabchevsky I.S.**, **Se Di**
Study of the effect of mortar joint material on the water vapor
permeability of building envelopes made of aerated concrete blocks

Тарарыкин Д.В.
Анализ расхождений проектных и фактических показателей
теплозащиты ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий 254

Tarykin D.V.
Analysis of discrepancies between design
and actual thermal protection performance indicators
of building envelope structures in operational buildings

Томилова Е.В., **Долгополов В.Е.**, **Данько В.П.**
Использование древесины как антисейсмического пояса
в каменной и кирпичной кладке: исторический опыт 259

Tomilova E.V., **Dolgopolov V.E.**, **Danko V.P.**
The usage of wood as an anti seismic belt in masonry and brickwork:
historical experience

Усанов С.В., **Бобр Н.В.**
Методологические основы оценки напряженно-деформированного
состояния и несущей способности сжатых и изгибаемых
железобетонных элементов на основе деформационных моделей 265

Usanov S.V., **Bobr N.V.**
Methodological foundations for assessing the stress-strain state
and load-bearing capacity of compressed and bent reinforced
concrete elements based on deformation models

Усанов С.В., **Бобр Н.В.**
Критический анализ современных теоретических основ
расчета железобетонных конструкций на ползучесть 269

Usanov S.V., **Bobr N.V.**
Critical analysis of modern theoretical foundations
for the creep analysis of reinforced concrete structures

Усанов С.В., **Гридунов А.В.**
Современные подходы к оценке прочности
и огнестойкости железобетонных конструкций 273

Usanov S.V., **Gridunov A.V.**
Modern approaches to assessing the strength
and fire resistance of reinforced concrete structures

Усанов С.В., **Гридунов А.В.**
Современные методологические подходы
к оценке долговечности морских железобетонных конструкций 277

Usanov S.V., **Gridunov A.V.**
Modern methodological approaches to assessing
the durability of marine reinforced concrete structures

Чилингарян В.Э., **Самандасюк Г.В.**, **Минаков В.Л.**
Влияние кавитационно активированных глин
на прочность цементных композитов 281

Chilingaryan V.E., **Samandasyuk G.V.**, **Minakov V.L.**
Effect of hydrodynamically activated clay additives
on the strength of cement composites

Шамшина К.В., **Овчинников И.Г.**
Методика определения геометрических параметров
коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона
железобетонных элементов и их относительное кинетическое влияние
на техническое состояние железобетонных конструкций 287

Shamshina K.V., **Ovchinnikov I.G.**
A methodology for determining the geometric parameters
of corrosive longitudinal cracks in the protective layer of concrete
in reinforced concrete elements and their relative kinetic impact
on the technical condition of reinforced concrete structures

Шестакова Е.В., **Абросимова Л.П.**, **Дубиненко Н.А.**
Применение стеклофибробетона
для изготовления фасадных элементов:
проблемы технологии изготовления и монтажа 292

Shestakova E.V., **Abrosimova L.P.**, **Dubinenko N.A.**
The use of glass fiber concrete for the manufacture of facade elements:
problems related to manufacturing and installation technology

Шнурникова Е.П., **Турчак А.Е.**
Конструктивные особенности фундаментов объектов
культурного наследия исторического поселения города Краснодар 297

Shnurnikova E.P., **Turchak A.E.**
Design features of the foundations of cultural heritage objects
in the historical settlement of Krasnodar

Шнурникова Е.П., **Веремьева А.В.**
Жилая функция как инструмент регенерации
исторического центра города 309

Shnurnikova E.P., **Veremieva A.V.**
Residential function as a tool for the regeneration
of the historic city center

Шнурникова Е.П., **Столбикова А.А.**
Интеграция общественных площадей в дорожно-транспортный каркас
исторического центра города (на примере г. Краснодара) 314

Shnurnikova E.P., **Stolbikova A.A.**
Integration of public squares into the road transport frame
of the historic city center (on the example of Krasnodar)

Шнурникова Е.П., **Фотиева В.А.**
Архитектурно-градостроительные принципы интеграции
современной застройки в историческую городскую среду 319

Shnurnikova E.P., **Fotieva V.A.**
Architectural and urban planning principles for integrating
modern construction into the historical urban environment

Яханов В.А., **Далецкий А.П.**
Повышение физико-механических характеристик
вибропрессованных изделий через оптимизацию
гранулометрии мелкого заполнителя 326

Yakhanov V.A., **Daletsky A.P.**
Enhancing the physicomechanical characteristics of vibropressed
products through fine aggregate gradation optimization

УДК 666.972

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНОВ

♦♦♦♦♦

THE USE OF SECONDARY RESOURCES IN CONCRETE PRODUCTION

Афанасьева Яна Владимировна
Член-корреспондент РИА и МИА,
преподаватель РУТ
Российская инженерная академия;
Международная инженерная академия;
Российский университет транспорта
info.tupolev@yandex.ru

Спиридонов Дмитрий Алексеевич
аспирант,
Российский университет транспорта

Хао Юйхан
аспирант,
Российский университет транспорта

Аннотация. В статье рассмотрены возможности использования вторичных ресурсов при производстве бетонов, что представляет значительный интерес для современной строительной индустрии. Бетон, без сомнения, является одним из наиболее востребованных строительных материалов в мире. В последние годы наблюдается тенденция к использованию не только классических бетонных смесей, но и инновационных композитных материалов, в том числе с применением новых вяжущих веществ и наполнителей. Включение в состав бетона переработанных материалов, например золы уноса из тепловых электростанций, дроблёного стекла, измельчённого кирпича и строительного мусора, открывает новые возможности для снижения негативного воздействия на окружающую среду и оптимизации использования природных ресурсов.

Ключевые слова: техногенное сырье, высококачественные бетонные смеси, вторичные материалы, наполненное вяжущее, экология, экономия.

Afanasieva Yana Vladimirovna
Corresponding member
of the RIA and MIA,
lecturer at RUT
Russian Academy of Engineering;
International Academy of Engineering;
Russian University of Transport
info.tupolev@yandex.ru

Spiridonov Dmitry Alekseevich
Graduate Student,
Russian University of Transport

Hao Yuhang
Graduate Student,
Russian University of Transport

Annotation. The article examines the possibilities of using secondary resources in concrete production, which is of considerable interest to the modern construction industry. Concrete is undoubtedly one of the most in□demand construction materials in the world. In recent years, there has been a trend towards using not only traditional concrete mixes but also innovative composite materials, including those using new binders and fillers. The inclusion of recycled materials in concrete, such as fly ash from thermal power plants, crushed glass, crushed brick, and construction waste, opens up new opportunities to reduce the negative impact on the environment and optimize the use of natural resources.

Keywords: man□made raw materials, high□quality concrete mixes, secondary materials, filled binder, ecology, savings.

Бетон по праву занимает ведущие позиции среди строительных материалов благодаря своим уникальным свойствам и широкому спектру применения. Классический состав бетона включает цемент, песок и/или щебень и воду. Однако модификация состава позволяет адаптировать материал под конкретные задачи и требования. В качестве дополнительных наполнителей при производстве бетона могут использоваться перлит, специальная бумажная масса, керамические и полистирольные шарики и другие материалы. Существует множество разновидностей бетона, каждая из которых предназначена для решения определённых задач: высокопрочные и армированные смеси для несущих конструкций, лёгкие бетоны с теплоизоляционными свойствами, материалы для сложных пространственных конструкций, пуленепробиваемые и радиационно-защитные бетоны [1].

Использование переработанных материалов в производстве бетона – это эффективный способ снижения углеродного следа и рационального использования природных ресурсов. Поскольку производство бетонных конструкций продолжает расти, внедрение вторичных материалов в строительный процесс становится всё более актуальным. Одним из ключевых направлений снижения выбросов CO_2 в строительной отрасли является применение бетонов, изготавливаемых с использованием переработанных компонентов [2].

Если говорить о строительных отходах, которые могут быть использованы при производстве бетона, к ним можно отнести:

1. Бой бетона и железобетона. Разработка эффективных методов использования остатков демонтированных зданий и сооружений уже много лет является актуальной задачей для большинства стран мира. Объем вновь образующихся строительных отходов в результате

демонтажа и разрушения зданий и сооружений ежегодно увеличивается. При разрушении и демонтаже зданий и сооружений образуется множество различных видов остатков, вид которых зависит в первую очередь от типа постройки. Наиболее пригодными для повторного использования являются остатки железобетонных конструкций и кирпичных стен. Вывозить данные остатки на мусорные полигоны – нерационально. Ведь бетон не разлагается и может долгие столетия лежать на свалке. Этот материал легко подвергается переработке. После измельчения, очистки от арматуры (с помощью электромагнитов) и сортировки по фракциям получают вторичный щебень и песок. Эти отходы являются достаточно качественным сырьем для производства вторичных заполнителей бетона.

Этапы производства боя бетона включают в себя:

– первичное измельчение бетонного лома с помощью гидроножниц или гидромолота;
– удаление крупных кусков арматуры;
– первичную сортировку материала;
– дробление крупных кусков (более 40–70 мм в диаметре);
– фракционирование, или разделение материала на фракции с заданными размерами;
– очистку материала от остатков стальной арматуры с использованием электромагнитов.

В результате переработки боя бетона получают следующие материалы:

– вторичный щебень, являющийся сыпучим материалом, с зернами размером от 5 до 40 мм в диаметре, который делится на стандартные фракции (5–10, 10–20, 20–40 и 40–80);

– песок из дробленого бетона, представляющий собой отсев вторичного щебня с зернами размером менее 5 мм совместно с тонкой цементной пылью. В зависимости от размера частиц песок из дробленого бетона делится на три размерные группы: мелкую, среднюю и крупную;

– песчано-щебеночную смесь (ПЩС) из дробленого бетона, состоящую из отсева и щебня, которая имеет широкий размерный диапазон фракций: от 0–5 до 0–120. Также смесь удобно заказывать в тех случаях, когда нужен одновременно крупный и мелкий материал – например, при обустройстве песчано-щебеночных подушек.

Вторичный щебень может стать достойной альтернативой традиционному, который изготавливают из таких горных пород, как гранит, амфиболит, базальт, известняк и другие. Однако даже наиболее очищенный бой бетона не может сравниться с натуральным щебнем и отсевом по качественным характеристикам. В таблице ниже (табл. 1) представлены параметры вторичного материала, показатели дроблёного гранита и известняка.

Таблица 1 – Основные параметры строительных материалов

	Бой бетона	Гранитный щебень	Известняковый щебень
Исходное сырье	Старые конструкции из бетона и железобетона	Магматическая порода – гранит	Осадочная порода – известняк
Марки по дробимости	300–600 (низкая прочность)	800–1600 (средняя и высокая прочность)	200–800 (низкая и средняя прочность)
Истираемость	И3-И4 (низкая и средняя износостойкость)	И1 (высокая износостойкость)	И2-И3 (средняя износостойкость)
Морозостойкость	F15-F50 (низкая морозостойкость)	F100-F400 (средняя и высокая морозостойкость)	F50-F200 (низкая и средняя морозостойкость)
Наличие засоряющих примесей	Допустимы включения обломков арматуры, боя кирпича, обрывков рубероида и другого строительного мусора до 7 % по массе	В норме отсутствуют	

Вторичный бетон находит применение в различных областях, включая строительство, в т.ч. дорожное, благоустройство территорий и декоративные работы.

Бой бетона привлекает своей доступностью, низкой стоимостью и экологичностью, имеет хорошую адгезию с цементом и достаточную прочность. Однако у него есть и недостатки, к которым относят:

– низкую морозостойкость: вторичный щебень производят из старых бетонных конструкций, которые в процессе эксплуатации получили микротрещины, в которые может проникнуть влага, способная при низких температурах разрушить материал;

– наличие посторонних примесей, таких как различные строительные отходы – доски, рубероид, шифер, кирпичи, линолеум, обои, стекло и прочее, попадающие в бетонный лом в процессе его переработки.

Использование вторичных заполнителей в бетоне способствует решению проблемы утилизации большей части строительных отходов, однако неоднородность такого сырья ограничивает его применение [3, 4].

2. Остатки бетонных смесей. Отечественные и зарубежные исследователи активно изучают возможности повторного использования не только переработанного некондиционного железобетона, но и компонентов бетонной смеси. При промывке самоходных бетономешалок безвозвратно теряется около 0,5 % ежегодного выпуска товарной бетонной смеси. Кроме того, определенное количество бетонной смеси, которое поставляется на строительные объекты, не может быть использовано по каким-либо причинам и снова возвращается на завод по производству товарного бетона. В целом потери бетона варьируются от 1 до 4 %. Неиспользованный бетон или остатки из автобетоносмесителей подвергают обработке: смесь разделяют на инертные фракции и шлам (воду с цементным молочком). Очищенную воду вновь задействуют в производстве, а твёрдые частицы применяют в качестве заполнителя (таб. 2) [5, 6].

Таблица 2 – Применение остатков бетонных смесей и их преимущества

Применение остатков бетонных смесей	Используемая фракция	Ключевые преимущества
Основания дорог	Крупная (20–40 мм)	Долговечность, сокращение логистических затрат
Производство бетонов низких марок	Средняя (5–20 мм)	Возможность замещения до 20 % инертных материалов, снижение расходов
Засыпка котлованов	Мелкая (0–10 мм)	Хорошая уплотняемость, экологичность
Ландшафтный дизайн	Смешанная	Декоративные качества, низкая стоимость
Дренажные системы	Крупная (10–40 мм)	Высокая проницаемость, долговечность

3. Шлаки. Шлаки металлургические или от дробления горных пород могут заменить часть природного щебня. Правительством Российской Федерации утверждена Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года (30 января 2018 г. опубликовано распоряжение Правительства Российской Федерации № 84-р). Одним из основных видов отходов являются огромные запасы шлаков металлургических производств, которые могут использоваться при производстве строительных материалов, а именно бетонов. Применение минеральных добавок, в частности шлаков приводит к повышению эффективности бетонных и железобетонных конструкций. Использование доменных гранулированных шлаков снижает топливно-энергетические затраты при производстве бетонов и цементов, и затраты на содержание оборудования [7].

4. Золы, шламы, отходы очистки сточных вод. Их применяют как активные минеральные добавки или наполнители. Например, зола от сжигания используется для получения лёгкого золобетона, в котором в качестве мелкого наполнителя выступает зола, полученная после сгорания каменного угля, а в качестве крупного заполнителя – различные виды щебня - известковый, доломитовый и т.п. В качестве вяжущего вещества используют портландцемент или известь, а затворение осуществляется водой. Кроме того, в золобетоне рекомендуется применение некоторых видов добавок, улучшающих его качество (гидрофобные добавки, пластификаторы). Основными достоинствами золобетона являются: легкость, пластичность и дешевизна значительной части сырья – золы, так как как она является отходами производства. Также существует практика включения золы от сжигания осадков городских сточных вод в состав шумозащитного пенобетона автоклавного твердения, который отличается высокими показателями прочности и резистентности к погодным условиям, обладает оптимальными акустическими характеристиками и не оказывает негативного воздействия на здоровье человека.

Преимущества применения подобных добавок следующие: частичная замена цемента повышает пуццолановую активность бетона, улучшает его коррозионную стойкость, снижает усадку и водопотребность смеси, облегчает укладку и уменьшает риск трещинообразования [8].

В строительной индустрии находит применение и стеклобой, который используется как компонент связующих материалов. Ещё один пример вторичного сырья – порошок, полученный из переработанного асфальтобетона (RAP), который может частично заменять цемент в бетонных смесях

Бетон, изготовляемый из отходов пригоден, например, для изготовления основания дорожного покрытия, ленточных фундаментов, фундаментов зданий, шумоотражающих стен, разделительных, направляющих полос на автострадах/автомобильных дорогах, сэндвич-панелей, стенок опалубочного камня и т. д.

К числу преимуществ использования строительных отходов при производстве бетонов относят:

– экономию на утилизацию отходов. Переработка вторичного сырья часто обходится дешевле, чем добыча и обогащение природного сырья, что снижает себестоимость бетона;

– экологичность и сбережение ресурсов. Сокращается потребность в добыче песка и гравия, уменьшается объём строительных отходов на полигонах;

– соответствие «зеленым» стандартам. Комплексное использование техногенного сырья позволяет экономить природные ресурсы.

А к ограничениям: требования к качеству исходного сырья; необходимость строгого контроля прочности; затраты на приобретение и обслуживание оборудования.

Но у вторичных материалов есть особенности, которые нужно учитывать:

– неоднородность. Вторичный заполнитель часто имеет угловатые частицы, шероховатые поверхности, микротрещины, повышенное содержание примесей и мусора.

– снижение некоторых характеристик. Может наблюдаться уменьшение прочности, морозостойкости, увеличение водопоглощения.

– требования к технологии. Для получения качественного бетона с вторичными заполнителями часто нужны специальные технологические решения.

– ограничения по применению. Вторичный бетон не рекомендуется для определенных конструкций, например фундаментов высотных зданий, мостов и т.п.

Учитывая как сильные, так и слабые стороны вторичных материалов в России введи в действие стандарт, регулирующий обращение со вторичными ресурсами, такие как: ГОСТ Р 72255–2025 «Щебень и песок вторичные из дроблёного бетона и железобетона». Данный ГОСТ устанавливает общие требования к процессам сбора, транспортировки, обработки и идентификации таких материалов. Это упрощает процесс использования каждого вида вторичного сырья и внедрение современных технологий переработки [9–11].

Выводы

Использование вторичных ресурсов в производстве бетона – перспективное направление, которое позволяет сочетать экономическую выгоду с заботой об экологии. Однако для успешного применения требуется тщательный подбор составов, учёт специфики каждого вида вторичного сырья и внедрение современных технологий переработки. По данным Перечня инициатив социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года, намечается тенденция дефицита нерудных строительных материалов, которые выступают в качестве инертных заполнителей, – песка, гравия, щебня и т.д. Восполнение дефицита возможно и за счет вовлечения в переработку низкосортного забалансового сырья техногенного происхождения. Кроме того, свойства некоторых отходов позволяют рассматривать возможность их использования не только в качестве инертных заполнителей в строительных материалах, но и для замены вяжущих веществ или полифункциональных добавок, улучшающих качество продукции.

Литература

1. Способ получения бетона из отходов и изготовляемый таким способом вторичный бетон. – URL : https://patents.google.com/patent/WO2016181174A1/ru (дата обращения 15.09.2026).
2. Методы сокращения углеродного следа при производстве, транспортировке и укладке бетонной смеси, научная статья. – URL : https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-1-2026/93-102.pdf (дата обращения 15.09.2026).
3. Использование вторичных заполнителей для производства бетона, Юниорстав 2024, Строительное и транспортное проектирование / Артём Чистяков, Сергей Кровяков, Андрей Игнатенко, Игорь Медведь. – DOI: 10.13164/Juniorstav.2024.24091
4. Применение вторичного бетона (боя бетона). – URL : https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/primenenie-betona/vidy-betona-i-ih-primenenie/primenenie-vtorichnogo-betona-boya-betona (дата обращения 13.09.2026).
5. Что такое рециклинг бетона и как это работает? – URL : https://www.elkon.ru/blog/view/23 (дата обращения 13.09.2026).
6. Гусев Б.В. Вторичное использование бетонов / Б.В. Гусев, В.А. Загурский. – М. : Стройиздат, 1988. – 96 с. (Курсом ускорения науч.-техн. прогресса). ISB N 5-274-00092–4
7. Эффективность применения гранулированных доменных шлаков при производстве бетонных смесей и бетонов / Л.А. Титова [и др.] // Научно-технический журнал Бетон и Железобетон. – 2021. – С. 16–20.
8. Литвинова Т.Е. Получение легкого золобетона как перспективное направление утилизации техногенных продуктов (на примере отходов водоотведения) / Т.Е. Литвинова, Д.В. Сучков // Записки Горного института. – 2023. – Т. 264. – С. 906–918. – EDN LMZCWZ. – URL : https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16020?ysclid=msz2zafl7h641497778 (дата обращения 12.09.2026).
9. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / Ю.М. Баженов [и др.]. – М. : Изд-во АСВ, 2008. – 350 с.

10. Мелкозернистые бетоны из вторичного сырья для ремонта и восстановления поврежденных зданий и сооружений: научное издание / Ю.М. Баженов [и др.]. – Грозный : ИП «Султанбегова Х.С.», 2011. – 342 с.
11. Каприелов С.С. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, В.Г. Дондуков // Строительные материалы. – 2017. – № 11. – С. 4–10.

References

1. Method for producing concrete from waste, and recycled concrete produced by this method. – URL : https://patents.google.com/patent/WO2016181174A1/ru (date of application 15.09.2026).
2. Methods for reducing the carbon footprint during the production, transportation, and placement of concrete mix (scientific article). – URL : https://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild-1-2026/93-102.pdf (date of application 15.09.2026).
3. Use of Recycled Aggregates for Concrete Production, Juniorstav 2024, Construction and Transport Engineering / Artyom Chistyakov, Sergey Krovyakov, Andrey Ignatenko, Igor Medved. DOI: 10.13164/Juniorstav.2024.24091
4. Use of recycled concrete (crushed concrete). – URL : https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/primenenie-betona/vidy-betona-i-ih-primenenie/primenenie-vtorichnogo-betona-boya-betona (date of application 13.09.2026).
5. What is concrete recycling and how does it work? – URL : https://www.elkon.ru/blog/view/23 (date of application 13.09.2026).
6. Gusev B.V. Reuse of concrete / B.V. Gusev, V.A. Zagursky. – M. : Stroyizdat, 1988. – 96 p. (Series: On the Path to Accelerating Scientific and Technical Progress). ISBN 5-274-00092-4
7. Efficiency of using granulated blast-furnace slags in the production of concrete mixes and concrete / L. A. Titova [et al.] // Scientific and Technical Journal «Concrete and Reinforced Concrete» (Beton i Zhelezobeton). – 2021. – P. 16–20.
8. Litvinova T.E. Production of lightweight ash-concrete as a promising approach to the utilization of technogenic products (a case study of water treatment waste) / T.E. Litvinova, D.V. Suchkov // Journal of Mining Institute. – 2023. – Vol. 264. – P. 906–918. – URL : https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16020?ysclid=msz2zafl7h641497778 (date of application 12.09.2026). EDN LMZCWZ
9. Technology of Concrete, Construction Products, and Structures / Yu.M. Bazhenov [et al.]. – M. : ASV Publishing House, 2008. – 350 p.
10. Fine-Grained Concretes Made from Recycled Materials for the Repair and Restoration of Damaged Buildings and Structures: A Scientific Publication / Yu.M. Bazhenov [et al.]. – Grozny : IP «Sultanbegova Kh.S.», 2011. – 342 p.
11. Kaprielov S.S. Cements and Admixtures for the Production of High-Strength Concretes / S.S. Kaprielov, A.V. Sheinfeld, V.G. Dondukov // Construction Materials (Stroitelnye Materialy). – 2017. – № 11. – P. 4–10.

УДК 624.04:004.8

ГЕНЕРАТИВНЫЙ ДИЗАЙН И ОПТИМИЗАЦИЯ СЕЧЕНИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ: СНИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ БЕЗ ПОТЕРИ НАДЕЖНОСТИ

♦♦♦♦♦

GENERATIVE DESIGN AND OPTIMIZATION OF CROSS-SECTIONS OF BEARING STRUCTURES: REDUCING MATERIAL INTENSITY WITHOUT LOSING RELIABILITY

Бабич Анатолий Сергеевич
студент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
babichanatoly15@mail.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается применение методов генеративного дизайна и генетических алгоритмов для оптимизации параметров сечений несущих конструкций. Анализируется возможность снижения материалоемкости при сохранении требуемого уровня надежности. Приводятся результаты сравнительного анализа традиционного подхода и подхода, основанного на эволюционных алгоритмах. Показано, что использование генеративного дизайна позволяет существенно сократить расход материалов без ущерба для несущей способности конструкций.

Ключевые слова: генеративный дизайн, генетические алгоритмы, оптимизация сечений, несущие конструкции, материалоемкость, надежность, BIM.

Babich Anatoly Sergeyevich
Student, Department of Industrial
and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
babichanatoly15@mail.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor in the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
svusanov@gmail.com

Annotation. The article discusses the application of generative design methods and genetic algorithms to optimize the cross-section parameters of load-bearing structures. The possibility of reducing material consumption while maintaining the required level of reliability is analyzed. The results of a comparative analysis of the traditional approach and the approach based on evolutionary algorithms are presented. It is shown that the use of generative design can significantly reduce material consumption without compromising the bearing capacity of structures.

Keywords: generative design, genetic algorithms, cross-section optimization, load-bearing structures, material consumption, reliability, BIM.

В современном строительном проектировании все более остро встает вопрос о снижении материалоемкости конструкций без потери их надежности и долговечности. Традиционный подход к проектированию несущих конструкций предполагает многократный перебор вариантов сечений, что требует значительных временных затрат и не всегда позволяет найти действительно оптимальное решение. Инженер, как правило, ограничивается несколькими вариантами, выбирая из них наиболее приемлемый по совокупности критериев. Такой подход не гарантирует достижения глобального оптимума, особенно при большом количестве варьируемых параметров.

В последние годы активно развиваются методы автоматизированного проектирования, основанные на использовании алгоритмов искусственного интеллекта. Одним из наиболее перспективных направлений является генеративный дизайн, который позволяет автоматически генерировать множество вариантов конструктивных решений и выбирать из них наилучшие по заданным критериям. Данный подход находит все более широкое применение в строительной отрасли. В работах Т.А. Юрошевой рассматривается применение генеративного дизайна для оптимизации компоновки объектов строительства с использованием среды разработки Dynamo Studio [1].

Генетические алгоритмы, получившие развитие в середине 1960-х годов благодаря трудам Дж. Холланда, имитируют эволюционный процесс с акцентом на механизмы наследования и рекомбинации генов [2]. В контексте оптимизации конструкций роль генов выполняют варьируемые параметры сечения, а роль хромосом – набор этих параметров для конкретного варианта конструкции. Популяция представляет собой множество различных вариантов конструктивного решения [2].

Применение генетических алгоритмов для проектирования строительных конструкций позволяет значительно сократить время поиска оптимального решения. В работе [3] предложе-

на методика оптимального проектирования несущих конструкций на основе генетического алгоритма. В качестве примера авторами рассмотрено проектирование стальной рамы при варьировании девяти параметров с использованием метода конечных элементов [3]. Было выявлено решение, соответствующее минимуму объема материала рамы [3].

Другой подход к применению генетических алгоритмов в строительном проектировании представлен в работе [4], где разработана методика эволюционного поиска рациональных параметров и структур систем усиления металлических ферм. Автор рассматривает два варианта усиления: увеличение сечений стержней и изменение конструктивной схемы объекта. Оптимизация ведется по критерию минимума стоимости конструкции усиления [4].

Особый интерес представляет применение генеративного дизайна для оптимизации железобетонных конструкций. В исследовании [5] представлена параметрическая алгоритмическая модель для автоматизированной оптимизации железобетонных зданий с плитными перекрытиями. Модель автоматизирует и оптимизирует процесс компоновки, обеспечивая измеримые улучшения пространственной эффективности при сохранении соответствия критериям несущей способности [5].

Разработанная модель интегрирует структурные и архитектурные параметры в едином подходе генеративного дизайна в среде информационного моделирования (BIM), что позволяет автоматизировать оценку структурно жизнеспособных и архитектурно согласованных вариантов расположения плит перекрытия [5]. Модель была реализована в среде визуального программирования Dynamo для Revit и использует генеративный движок для исследования различных вариантов проектирования с учетом структурных ограничений [5].

Результаты валидации модели на трех примерах показали снижение затрат от 2,7 до 17 процентов, при этом экономия материалов составила до 13,38 процента бетона и до 20,87 процента арматуры. Время вычислений составляло от 120 до 930 секунд [5]. Эти данные свидетельствуют о высокой эффективности применения генеративного дизайна для железобетонных конструкций.

Для наглядного сравнения эффективности традиционного подхода и подхода на основе генеративного дизайна были рассмотрены результаты оптимизации стальной рамы, представленные в работе [3], и результаты оптимизации железобетонной плиты перекрытия из исследования [5].

Литература

1. Юрошева Т.А. Оптимизация компоновки объектов строительства в пространстве методом генеративного дизайна с использованием среды разработки DYNAMO STUDIO // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – Т. 52. – № 3. – С. 172–182. – DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-3-172-182
2. Генетические алгоритмы и их применение для оптимального проектирования строительных конструкций / А.Г. Юрьев [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 1. – С. 45–52.
3. Юрьев А.Г. Оптимизация строительных конструкций на основе генетического алгоритма / А.Г. Юрьев, С.В., Клюев, А.В. Клюев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – № 3. – С. 18–23.
4. Алексейцев А.В. Оптимальный структурно-параметрический синтез систем усиления металлических ферм // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – № 3. – С. 210–218.
5. Salah M. Generative Design-Driven Optimization for Effective Concrete Structural Systems // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 13. – DOI: 10.3390/buildings15132284
6. Кашо Ю.Х. Исследование использования искусственного интеллекта в расчётах конструкций. Выпускная квалификационная работа. – Трир : Университет прикладных наук Трира, 2025.
7. Artificial intelligence for design of spatial structures and joints: A state-of-the-art review // Journal of Building Engineering. – 2026. – Vol. 98. – DOI: 10.1016/j.jobe.2026.112087

References

1. Yurosheva T.A. Optimization of the spatial layout of construction objects using generative design methods in the DYNAMO STUDIO development environment // Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. – 2025. – Vol. 52. – № 3. – P. 172–182. – DOI: 10.21822/2073-6185-2025-52-3-172-182
2. Genetic algorithms and their application to the optimal design of building structures / A.G. Yuryev [et al.] // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2020. – № 1. – P. 45–52.

3. Yuryev A.G. Optimization of structural designs based on a genetic algorithm / A.G. Yuryev, S.V. Klyuev, A.V. Klyuev // Structural Mechanics and Analysis of Structures. – 2019. – № 3. – P. 18–23.
4. Alekseytsev A.V. Optimal structural-parametric synthesis of strengthening systems for metal trusses // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Structures. – 2020. – № 3. – P. 210–218.
5. Salah M. Generative Design-Driven Optimization for Effective Concrete Structural Systems // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 13. – DOI: 10.3390/buildings15132284
6. Qasho Y.H. Research on the Use of Artificial Intelligence in Structural Analysis. Final Qualifying Work. – Trier : Trier University of Applied Sciences, 2025.
7. Artificial intelligence for design of spatial structures and joints: A state-of-the-art review // Journal of Building Engineering. – 2026. – Vol. 98. – DOI: 10.1016/j.jobe.2026.112087

УДК 624.05:004.932.2

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ФАСАДОВ С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И БПЛА: ОТ РАСПОЗНАВАНИЯ ТРЕЩИН ДО КАТЕГОРИИ АВАРИЙНОСТИ

♦♦♦♦♦

AUTOMATED EXAMINATION OF FACADES USING MACHINE VISION AND UAVS: FROM CRACK RECOGNITION TO EMERGENCY CATEGORY

Бабич Анатолий Сергеевич
студент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
babichanatoly15@mail.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается применение беспилотных летательных аппаратов и технологий компьютерного зрения для автоматизированного обследования фасадов зданий. Анализируются методы распознавания дефектов с использованием сверточных нейронных сетей и их трансформация в оценку категории технического состояния. Приводятся результаты апробации разработанных систем на реальных объектах. Показано, что интеграция глубокого обучения с БПЛА-съемкой позволяет автоматизировать процесс обследования и сократить время обработки данных без потери точности.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, машинное зрение, обследование фасадов, глубокое обучение, техническое состояние зданий, семантическая сегментация.

Babich Anatoly Sergeyevich
Student, Department of Industrial
and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
babichanatoly15@mail.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor in the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
svusanov@gmail.com

Annotation. The article discusses the use of unmanned aerial vehicles and computer vision technologies for automated inspection of building facades. The methods of defect recognition using convolutional neural networks and their transformation into an assessment of the category of technical condition are analyzed. The results of testing the developed systems on real objects are presented. It is shown that the integration of deep learning with UAV imaging makes it possible to automate the survey process and reduce data processing time without loss of accuracy.

Keywords: unmanned aerial vehicles, machine vision, facade inspection, deep learning, technical condition of buildings, semantic segmentation.

Своевременное обследование фасадов зданий является обязательным условием обеспечения их безопасной эксплуатации. Воздействие атмосферных факторов, температурных колебаний и механических нагрузок приводит к появлению различных дефектов, среди которых трещины, отслоения, коррозия арматуры и нарушение герметичности швов. Традиционный метод обследования предполагает визуальный осмотр фасадов с использованием люлек или альпинистского снаряжения. Такой подход требует значительных трудозатрат и сопряжен с риском для жизни обследователей [1]. Кроме того, точность оценки состояния фасада зависит от квалификации и опыта эксперта, что вносит субъективность в итоговое заключение.

Развитие беспилотных авиационных систем и методов машинного зрения открывает новые возможности для автоматизации процесса обследования. Использование БПЛА позволяет выполнять съемку фасадов с различных ракурсов без необходимости организации доступа к поверхности здания. Применение алгоритмов глубокого обучения для анализа полученных изображений обеспечивает объективность и воспроизводимость результатов. В работе [2] предложена система автоматизированного контроля качества строительных объектов на основе БПЛА и цифровых информационных моделей, что подтверждает актуальность данного направления для строительной отрасли.

Задача автоматизированного обнаружения дефектов фасадов сводится к обработке изображений, полученных с помощью БПЛА, и классификации обнаруженных паттернов. Наиболее распространенными дефектами являются трещины, сколы, отслоения и следы протечек. Сложность их автоматического распознавания обусловлена значительным разбросом размеров и формы, а также влиянием условий съемки, таких как освещенность и угол наклона камеры.

Современные подходы к решению этой задачи основаны на использовании сверточных нейронных сетей. В отличие от традиционных методов обработки изображений, основанных на детекторах границ, нейросетевые модели способны выделять сложные текстуры и формы дефектов с учетом контекста фасада. В исследовании [3] предложена модель на основе архитектуры EfficientUNet++, позволяющая одновременно обнаруживать несколько типов дефектов, различающихся на несколько порядков по площади. Авторы провели обучение модели на наборе данных, включающем изображения фасадов из различных материалов, и добились высокой точности распознавания как тонких трещин, так и крупных сколов и разрушений остекления [3].

Отдельного внимания заслуживает проблема мультиклассовой классификации дефектов. Как показано в работе [4], точность распознавания отдельных дефектов достигает 94–98 процентов, однако при одновременном выявлении двух и более типов дефектов точность снижается до 40–70 процентов. Это связано с тем, что различные дефекты часто имеют схожие визуальные характеристики или локализуются в одних и тех же областях фасада. Для повышения точности исследователи применяют ансамблевые подходы, комбинируя несколько нейросетевых архитектур. Например, в работе [5] ансамбль из Vision Transformer и ConvNeXt показал точность 90,9 процента при классификации четырех типов дефектов фасадов.

Процесс автоматизированного обследования фасадов включает три основных этапа: планирование полетного задания, сбор данных с помощью БПЛА и последующая обработка полученных изображений с использованием алгоритмов машинного зрения. На этапе планирования определяется траектория движения дрона, обеспечивающая полное покрытие фасада с необходимым перекрытием кадров. Для высотных зданий оптимальное расстояние съемки составляет 20–25 метров, что обеспечивает баланс между детализацией изображений и эффективностью маршрута [6]. Для малоэтажных объектов съемку можно выполнять с расстояния 5–10 метров для достижения максимальной точности.

Сбор данных может выполняться с использованием различных сенсоров. Наибольшее распространение получили RGB-камеры, обеспечивающие высокое разрешение и цветопередачу. Для выявления дефектов, неразличимых в видимом диапазоне, применяются тепловизионные камеры, позволяющие обнаруживать участки с аномальным температурным режимом, что указывает на наличие протечек или нарушение теплоизоляции. В работе [6] показано, что использование комбинации RGB- и тепловизионных изображений позволяет выявлять трещины с точностью 92,3 процента и протечки с точностью 86,44 процента.

Таблица 1 – Сравнение результатов обнаружения дефектов фасадов с использованием различных нейросетевых архитектур

Архитектура	Тип дефекта	Точность, %	Полнота, %	F1-мера, %
EfficientUNet++	Трещины	85,2	88,4	86,7
EfficientUNet++	Сколы	90,6	91,2	90,9
YOLOv11	Трещины	71,9	90,3	81,0
K-Net (RGB)	Трещины	89,1	92,3	90,7
K-Net (тепло)	Протечки	81,7	86,4	84,0

На этапе обработки изображений выполняется сегментация дефектов на пиксельном уровне. Такой подход позволяет не только определить наличие дефекта, но и измерить его геометрические параметры, включая длину, ширину и площадь. В работе [8] представлена система, использующая результаты пиксельной сегментации для автоматического определения ширины раскрытия трещин и площади отслоений с применением морфологических операций. Полученные количественные характеристики сопоставляются с нормативными значениями для присвоения категории технического состояния.

Ключевым этапом автоматизированного обследования является перевод обнаруженных дефектов в оценку технического состояния здания. Для этого результаты распознавания дефектов и их количественные характеристики сопоставляются с требованиями нормативных документов. В зависимости от ширины раскрытия трещин, их протяженности и плотности расположения, а также от площади повреждений фасадного покрытия объекту присваивается одна из категорий состояния: работоспособное, ограниченно работоспособное, недопустимое или аварийное.

Разработкой таких систем активно занимаются российские исследователи. Специалисты Пермского национального исследовательского политехнического университета создают программу, которая на основе фотографий трещин определяет не только их наличие, но и категорию технического состояния здания с учетом особенностей кирпичных и панельных конструкций. Время обработки одного кадра в настоящее время составляет менее 20 миллисекунд, а

точность определения достигает 60 процентов. В перспективе планируется повысить точность до 95 процентов и обеспечить обработку видео в реальном времени [9].

Таблица 2 – Классификация категорий технического состояния по результатам автоматизированного обследования

Категория	Характеристика дефектов	Рекомендуемые действия
Работоспособное	Трещины шириной до 0,2 мм, единичные	Плановые осмотры
Ограниченно работоспособное	Трещины 0,2–1,0 мм, локальные отслоения	Дополнительное обследование, ремонт
Недопустимое	Трещины >1,0 мм, значительные повреждения	Внеплановое обследование, усиление
Аварийное	Сквозные трещины, обрушения покрытия	Немедленные меры, ограничение доступа

Эффективность автоматизированного обследования существенно повышается при интеграции полученных данных в цифровые информационные модели зданий. В работе [10] предложена система, в которой результаты пиксельной сегментации дефектов регистрируются на трехмерной модели, построенной методами фотограмметрии. Это позволяет визуализировать распределение дефектов по фасаду и предоставить экспертам наглядную основу для принятия решений по ремонту и усилению.

В исследовании [11] представлена концепция одновременного цифрового двойника, объединяющего стенолазного робота, систему сегментации дефектов и облачную платформу управления проектами. Предложенная система обеспечивает количественную оценку дефектов с погрешностью длины 1,14 сантиметра и погрешностью позиционирования 0,83 сантиметра, а также поддерживает временную трассировку изменений состояния фасада [11].

Создание цифровых двойников на основе данных БПЛА-съемки и автоматизированной обработки изображений позволяет перейти от разовых обследований к непрерывному мониторингу технического состояния зданий. В работе [12] отмечено, что использование таких технологий сокращает стоимость обследования в 4–5 раз, а скорость осмотра зданий возрастает аналогичным образом по сравнению с традиционным ручным методом.

Применение беспилотных летательных аппаратов и технологий машинного зрения для обследования фасадов зданий позволяет значительно повысить эффективность и объективность оценки их технического состояния. Современные нейросетевые модели обеспечивают распознавание нескольких типов дефектов с высокой точностью, а использование пиксельной сегментации дает возможность измерять геометрические параметры повреждений. Сопоставление полученных данных с нормативными требованиями позволяет автоматически присваивать категорию технического состояния, что сокращает время подготовки заключений и снижает влияние человеческого фактора.

Наиболее перспективным направлением является интеграция автоматизированного обследования с цифровыми информационными моделями, что создает основу для непрерывного мониторинга состояния фасадов. Дальнейшее развитие технологий связано с повышением точности распознавания дефектов в сложных условиях съемки и расширением номенклатуры выявляемых повреждений.

Литература

1. Кашо Ю.Х. Исследование использования искусственного интеллекта в расчётах конструкций. Выпускная квалификационная работа. – Трир : Университет прикладных наук Трира, 2025.
2. Учёные СФУ научат ИИ контролировать качество строительства. – URL : https://sfu.ru/ru/media/news/e3a21a17-fdd6-4f9e-8e73-51925d83a290 (дата обращения 15.07.2026).
3. Defects inspection system for building facades using drones and deep learning method // Expert Systems with Applications. – 2025. – DOI: 10.1016/j.eswa.2025.128330
4. Önal P. Multiclass defect detection on building façades using deep learning / P. Önal, E. Edis // Automation in Construction. – 2024. – Vol. 162. – DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105388.
5. Ensembles of Deep Neural Networks for the Automatic Detection of Building Facade Defects From Images // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 164953–164965. – DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3494215
6. Fan Y. UAV and Deep Learning for Automated Detection and Visualization of Façade Defects in Existing Residential Buildings / Y. Fan, J. Mai, F. Xue // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – № 23. – DOI: 10.3390/s25237118

7. Enhancing façade condition assessment through CNN-based crack detection using UAS imagery // Journal of Building Pathology and Rehabilitation. – 2026. – Vol. 11. – DOI: 10.1007/s41024-026-00780-3
8. A Comprehensive Framework for Automated Facade Defect Evaluation Using Deep Learning // 2025 IEEE International Conference on Image Processing. – Tallinn, 2025.
9. ИИ научат выявлять аварийные здания с помощью дронов. – URL : https://tass.ru/nauka/23118433 (дата обращения 15.07.2026).
10. Method for quality inspection during the execution of facades based on UAS images and Machine Learning algorithms / A.S. Silva [et al.] // International Journal of Construction Management. – 2025. – DOI: 10.1080/15623599.2025.2520376
11. Simultaneous Digital Twin: Chaining Climbing-Robot, Defect Segmentation, and Model Updating for Building Facade Inspection // Buildings. – 2026. – Vol. 16. – № 3. – DOI: 10.3390/buildings16030646
12. ДроноСкан: технология дистанционного обследования зданий и сооружений на основе БПЛА и Искусственного интеллекта. – URL : https://pt.2035.university/project/dronoskan

References

1. Qasho Y.H. Research on the Use of Artificial Intelligence in Structural Analysis. Final Qualifying Work. – Trier : Trier University of Applied Sciences, 2025.
2. Siberian Federal University (SFU) researchers to train AI to monitor construction quality. – URL : https://sfu.ru/ru/media/news/e3a21a17-fdd6-4f9e-8e73-51925d83a290 (date of application 15.07.2026).
3. Defects inspection system for building facades using drones and deep learning method // Expert Systems with Applications. – 2025. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.128330
4. Önal P. Multiclass defect detection on building façades using deep learning / P. Önal, E. Edis // Automation in Construction. – 2024. – Vol. 162. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105388
5. Ensembles of Deep Neural Networks for the Automatic Detection of Building Facade Defects From Images // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 164953–164965. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3494215
6. Fan Y. UAV and Deep Learning for Automated Detection and Visualization of Façade Defects in Existing Residential Buildings / Y. Fan, J. Mai, F. Xue // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – № 23. DOI: 10.3390/s25237118
7. Enhancing façade condition assessment through CNN-based crack detection using UAS imagery // Journal of Building Pathology and Rehabilitation. – 2026. – Vol. 11. DOI: 10.1007/s41024-026-00780-3
8. A Comprehensive Framework for Automated Facade Defect Evaluation Using Deep Learning // 2025 IEEE International Conference on Image Processing. – Tallinn, 2025.
9. AI will be taught to identify unsafe buildings using drones. – URL : https://tass.ru/nauka/23118433 (date of application 15.07.2026).
10. Method for quality inspection during the execution of facades based on UAS images and Machine Learning algorithms / A.S. Silva [et al.] // International Journal of Construction Management. – 2025. DOI: 10.1080/15623599.2025.2520376
11. Simultaneous Digital Twin: Chaining Climbing-Robot, Defect Segmentation, and Model Updating for Building Facade Inspection // Buildings. – 2026. – Vol. 16. – № 3. DOI: 10.3390/buildings16030646

УДК 624.012.45.004.69

ВОЗДЕЙСТВИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ КИСЛОТ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИИ

♦♦♦♦♦

EFFECT OF VARIOUS TYPES OF ACIDS ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Баранова П.С.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
a_apollinaria_a@mail.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье систематизированы данные о воздействии различных неорганических кислот (соляной, серной, азотной, фосфорной) на железобетонные конструкции. Рассмотрены общие механизмы кислотной коррозии цементного камня: диффузия кислотных компонентов в поровое пространство, нейтрализация гидроксильных ионов, растворение продуктов гидратации и декальцинация C-S-H-фаз при снижении pH ниже критических значений. Показано, что воздействие соляной кислоты сопровождается образованием хорошо растворимого хлорида кальция и частичной кольматацией пор гелем кремнекислоты, что при определённых условиях временно повышает прочность материала. В отличие от этого, серная кислота вызывает дополнительно сульфатную коррозию с образованием гипса и эттрингита, приводящую к объёмным деформациям и растрескиванию. Установлено, что значение pH = 3,0 является критическим порогом, ниже которого механизм коррозии существенно изменяется, а упрощённые модели расчёта её скорости становятся неприменимыми. Проанализировано влияние концентрации кислоты, растворимости образующихся солей кальция, скорости движения агрессивной жидкости, состава цемента и свойств заполнителя на интенсивность деградации. Обоснована целесообразность применения цементов с пониженным содержанием кальция и кислотостойких заполнителей для повышения стойкости конструкций.

Ключевые слова: железобетон, кислотная коррозия, соляная кислота, серная кислота, декальцинация, эттрингит, pH, долговечность.

Baranova P.S.
Student group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
a_apollinaria_a@mail.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor in the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
svusanov@gmail.com

Annotation. The article systematizes scientific data on the effect of various inorganic acids (hydrochloric, sulfuric, nitric, phosphoric) on reinforced concrete structures. The general mechanisms of acid corrosion of cement paste are considered: diffusion of acidic components into the pore space, neutralization of hydroxyl ions, dissolution of hydration products, and decalcification of C-S-H phases as pH drops below critical values. It is shown that hydrochloric acid attack is accompanied by the formation of highly soluble calcium chloride and partial pore clogging by silica gel, which under certain conditions temporarily increases material strength. In contrast, sulfuric acid additionally causes sulfate corrosion with the formation of gypsum and ettringite, leading to volumetric expansion and cracking. A pH value of 3.0 is identified as a critical threshold below which the corrosion mechanism changes significantly and simplified rate models become inapplicable. The influence of acid concentration, solubility of the resulting calcium salts, flow velocity of the aggressive liquid, cement composition, and aggregate properties on degradation intensity is analyzed. The use of low-calcium cements and acid-resistant aggregates is recommended to enhance the durability of reinforced concrete structures in acidic environments.

Keywords: reinforced concrete, acid corrosion, hydrochloric acid, sulfuric acid, decalcification, ettringite, pH, durability.

Железобетон является одним из наиболее распространённых конструкционных материалов в промышленном и гражданском строительстве. Однако эксплуатация железобетонных конструкций в условиях агрессивных сред, в частности при контакте с кислотами, приводит к значительному снижению их долговечности и несущей способности. Проблема кислотной коррозии бетона и железобетона особенно актуальна для объектов химической, нефтеперерабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, очистных сооружений, систем водоотведения, а также для конструкций, подверженных воздействию кислотных дождей.

В зависимости от вида кислоты, её концентрации и условий эксплуатации механизмы разрушения цементного камня могут существенно различаться. Согласно классификации,

представленной в DIN EN 206-1, степень агрессивности кислотной среды подразделяется на классы воздействия XA1–XA3 в зависимости от значения pH; при pH ниже 4,0 для защиты конструкций, как правило, требуются специальные покрытия.

Цель настоящей работы – систематизировать имеющиеся научные данные о воздействии различных неорганических кислот (серной, соляной, азотной, фосфорной) на железобетонные конструкции, выявить общие закономерности и специфические особенности коррозионных процессов.

Вопросам кислотной коррозии бетонных и железобетонных конструкций посвящено значительное число исследований как зарубежных, так и отечественных авторов. В работе Biczók (1956, 1960), цитируемой в венгерском обзоре, установлено, что среди неорганических кислот наиболее часто коррозию растворения вызывают соляная (HCl), серная (H_2SO_4), азотная (HNO_3), фосфорная (H_2PO_4) и угольная (H_2CO_3) кислоты. В исследовании отмечено, что воздействие кислот на цементный камень приводит к формированию деградированного слоя с высокой пористостью и низкой механической прочностью, причём скорость деградации определяется преимущественно диффузией кислотных компонентов через этот слой к неповреждённому материалу.

Механизмы кислотной коррозии подробно рассмотрены в работе, где выделены три основных процесса: проникновение кислоты в поровую жидкость, выщелачивание растворённых ионов кальция и гидроксила, а также растворение продуктов гидратации. Важно отметить, что в случае серной кислоты (H_2SO_4) процесс коррозии сопровождается вторичными реакциями – образованием гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) и последующим формированием эттрингита, что обусловливает дополнительное расширяющее воздействие на структуру материала.

Российскими исследователями было экспериментально подтверждено, что при контакте бетона с соляной кислотой происходит разрушение гидросиликата кальция и других гидратных фаз с образованием гидроксида кальция. Растворимость $Ca(OH)_2$ при 18–20 °C составляет 1,1 г/л, что способствует его переносу в окружающую среду и повышению pH раствора на начальных этапах. Образующийся хлорид кальция ($CaCl_2$) хорошо растворим в воде и практически полностью вымывается из пор бетона, тогда как гель кремнекислоты ($SiO_2 \cdot nH_2O$) имеет низкую растворимость (около 0,01 г/л) и остаётся в порах, вызывая их частичную кольматацию. На 14-е сутки выдерживания цементного камня в 1 %-ной HCl прочность образцов достигала 35,9 МПа, что связывается с уплотнением структуры за счёт накопления геля кремнекислоты.

В работе на основе моделирования кислотной коррозии установлено, что значение pH = 3,0 служит критическим порогом: при pH ниже 3,0 потребление ионов H^+ значительно превышает количество выщелачиваемых ионов Ca^{2+}, что объясняется реакциями ионов кальция с сульфатами с образованием осадка $CaSO_4$ при моделировании сернокислотных дождей. В диапазоне pH 2–7 предложенная упрощённая формула для расчёта скорости растворения кальция обеспечивает приемлемую точность, однако при более низких значениях pH наблюдается существенное отклонение экспериментальных данных.

Общие механизмы кислотной коррозии цементного камня

Коррозия цементного камня под действием кислот представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий диффузию кислотных компонентов в поровое пространство, нейтрализацию гидроксильных ионов, растворение продуктов гидратации и образование новообразований. Общая схема процесса включает:

1. Проникновение кислоты (H^+-ионов и кислотных остатков) в поровую систему бетона.
2. Реакция с гидроксидом кальция $Ca(OH)_2$ – наиболее легкорастворимой фазой цементного камня:

$$Ca(OH)_2 + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + 2H_2O.$$

3. Растворение гидросиликатов кальция (C-S-H) при снижении pH ниже 12,4 с образованием аморфного геля кремнекислоты:

$$CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + SiO_2 \cdot nH_2O + H_2O.$$

4. Декальцинация гидроалюминатных и гидроферритных фаз при дальнейшем снижении pH.

В результате формируется деградированный слой с высокой пористостью, содержащий остаточные гидроксиды алюминия и железа (при pH > 3–4 и pH > 1–2 соответственно). Скорость коррозии возрастает при механическом удалении деградированного слоя (абразивный износ, гидродинамическое воздействие) и при циклическом увлажнении и высыхании.

Воздействие соляной кислоты (HCl)

Соляная кислота относится к сильным минеральным кислотам и оказывает выраженное коррозионное воздействие на цементный камень. Взаимодействие HCl с гидроксидом кальция протекает по реакции:

$$Ca(OH)_2 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O.$$

Образующийся хлорид кальция хорошо растворим в воде (растворимость около 745 г/л при 20 °C), что обусловливает его практически полное вымывание из поровой структуры. В то же время при разрушении гидросиликата кальция формируется гель кремнекислоты:

$$2CaO \cdot SiO_2 + 2HCl + nH_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + CaCl_2 + SiO_2 \cdot nH_2O\downarrow.$$

Этот гель, имеющий низкую растворимость (около 0,01 г/л), остаётся в порах и может частично закупоривать поровое пространство, замедляя дальнейшее проникновение кислоты. По данным экспериментальных исследований, при выдерживании образцов цементного камня в 1 %-ном растворе HCl наблюдалось повышение прочности на 14-е сутки до 35,9 МПа, что авторы связывают с уплотняющим эффектом накопления геля кремнекислоты. Однако дальнейшее накопление большего объёма геля приводило к разрыву пор и последующему снижению прочности.

Анализ фильтрата после выдерживания цементного камня в растворах HCl различной концентрации показывает наличие ионов Ca^{2+}, Fe^{3+}, Mg^{2+} и Al^{3+}, причём содержание Ca^{2+} и Fe^{3+} возрастает с увеличением концентрации кислоты и времени контакта.

Воздействие серной кислоты (H_2SO_4)

Воздействие серной кислоты на железобетонные конструкции характеризуется рядом специфических особенностей. Помимо общего механизма декальцинации и растворения продуктов гидратации, взаимодействие с серной кислотой приводит к образованию гипса:

$$Ca(OH)\ 2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O.$$

Образующийся гипс может оказывать двоякое воздействие на структуру материала. С одной стороны, осаждение гипса в порах у поверхности может снижать пористость деградированного слоя и замедлять диффузию кислоты. С другой стороны, при взаимодействии гипса с гидроалюминатными фазами цементного камня происходит формирование эттрингита ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), характеризующегося значительным увеличением молярного объёма (примерно в 2,5 раза по сравнению с исходными фазами), что приводит к внутренним напряжениям и растрескиванию материала.

В работе при моделировании воздействия сернокислотных дождей установлено, что при концентрации сульфат-ионов 6,7 ммоль/л и pH = 1,87 начинается образование осадка $CaSO_4$. Важно отметить, что значение pH = 3,0 является критическим: при pH < 3,0 механизм растворения цементного камня существенно изменяется, и упрощённые модели расчёта скорости коррозии становятся неприменимыми.

Воздействие других кислот

Азотная кислота (HNO_3) и фосфорная кислота (H_2PO_4) также относятся к кислотам растворения. При взаимодействии с цементным камнем образуются соответственно кальциевая селитра $Ca(NO_3)_2$ и фосфаты кальция. Растворимость образующихся солей в значительной мере определяет скорость коррозионного процесса: чем выше растворимость соли, тем быстрее она вымывается из порового пространства, и тем интенсивнее протекает коррозия. Олеум (дымящая серная кислота) представляет собой раствор SO_3 в безводной H_2SO_4 и характеризуется исключительно высокой агрессивностью, однако его воздействие на железобетон требует отдельного рассмотрения с учётом высокой температуры и обезвоживающих свойств.

Факторы, влияющие на интенсивность коррозии

Интенсивность кислотной коррозии железобетона определяется совокупностью факторов:

1. Концентрация кислоты и значение pH: Снижение pH ускоряет процесс деградации, при этом для каждого вида кислоты существует критический уровень pH, ниже которого механизм коррозии изменяется.

2. Вид кислоты и растворимость образующейся соли: Кислоты, дающие хорошо растворимые соли кальция (HCl, HNO_3), вызывают более интенсивное выщелачивание.

3. Скорость движения агрессивной жидкости: Увеличение скорости потока жидкости ускоряет коррозию за счёт механического удаления деградированного слоя и интенсификации массообмена.

4. Состав цемента и наличие добавок: Замена портландцемента на цементы с пониженным содержанием кальция (с добавлением золы-уноса, доменного шлака) может повышать кислотную стойкость за счёт снижения количества растворимых фаз.

5. Свойства заполнителя: Применение кислотостойких заполнителей (кварц, гранит) уменьшает площадь контакта кислоты с цементным камнем и снижает скорость коррозии.

Сравнительная характеристика воздействия кислот

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика воздействия различных кислот на цементный камень на основе данных.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика воздействия кислот на цементный камень (по данным [1, 4, 5])

Характеристика	Соляная кислота (HCl)	Серная кислота (H_2SO_4)	Азотная кислота (HNO_3)
Растворимость соли кальция	Очень высокая ($CaCl_2$)	Низкая ($CaSO_4$)	Высокая ($Ca(NO_3)_2$)
Образование вторичных фаз	Отсутствует	Гипс, эттрингит	Отсутствует
Характер деградации	Выщелачивание, кольматация гелем SiO_2	Выщелачивание + сульфатное расширение	Интенсивное выщелачивание
Критическое значение pH	~3,0	~3,0	Данных недостаточно
Влияние на прочность на 14 сут. (1 % р-р)	Повышение до 35,9 МПа	Требуется дополнительная проверка	Требуется дополнительная проверка

Таблица 2 – Классификация агрессивности кислых сред (по данным [5])

Степень агрессивности	Значение pH	Характеристика
Слабая	5,0 < pH ≤ 6,5	Незначительное воздействие
Средняя	4,0 < pH ≤ 5,0	Умеренное воздействие, возможна защита составом бетона
Сильная	pH ≤ 4,0	Требуются специальные защитные покрытия

Таблица 3 – Кинетика изменения прочности цементного камня при воздействии HCl (по данным [1])

Время выдерживания, сут	Прочность при сжатии, МПа (1 % HCl)	Характер процесса
0 (контроль)	40,2	Исходная структура
7	33,1	Начальное разупрочнение
14	35,9	Уплотнение за счёт геля SiO_2
28	Требуется дополнительная проверка	Требуется дополнительная проверка

Кислотная коррозия железобетонных конструкций представляет собой сложный физико-химический процесс, включающий диффузию кислотных компонентов, нейтрализацию гидроксидов, растворение продуктов гидратации цемента и образование вторичных фаз. Основными механизмами являются выщелачивание ионов кальция и декальцинация C-S-H-фаз при снижении pH поровой жидкости ниже критических значений.

Воздействие соляной кислоты характеризуется образованием хорошо растворимого хлорида кальция и практически полным его вымыванием, а также кольматацией пор гелем кремнекислоты, которая при определённых условиях может временно замедлять коррозионный процесс. Экспериментально установлено повышение прочности цементного камня на 14-е сутки в 1 %-ном растворе HCl до 35,9 МПа за счёт уплотнения структуры.

Серная кислота, помимо выщелачивания, вызывает сульфатную коррозию с образованием гипса и эттрингита, что сопровождается объёмными деформациями и растрескиванием материала. Значение pH = 3,0 является критическим порогом, при котором механизм коррозии существенно изменяется.

Интенсивность коррозии определяется видом кислоты (растворимостью образующихся солей кальция), её концентрацией, скоростью движения жидкости, составом цемента и свойствами заполнителя. Значительное снижение скорости коррозии наблюдается при pH ниже 3,0, что требует применения специальных защитных мер при эксплуатации конструкций в условиях сильнокислых сред.

Перспективным направлением повышения кислотной стойкости железобетонных конструкций является использование цементов с пониженным содержанием кальция и кислотостойких заполнителей, однако для количественной оценки долговечности требуется дальнейшее развитие математических моделей, учитывающих как химические, так и транспортные процессы в деградирующем слое.

Литература

1. Влияние степени наполнения цеолитсодержащим сырьём на коррозионную стойкость цементного камня в среде соляной кислоты // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 7. – С. 34–41.
2. DIN EN 206-1:2000. Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. – Berlin : Beuth Verlag, 2000.
3. Pavlík V. The rate of corrosion of hardened cement pastes and mortars in acid solutions / V. Pavlík, S. Unčík // Ceramics – Silikáty. – 1997. – Vol. 41. – № 2. – P. 53–58.
4. Macrokinetics of the deterioration of cement-based grouting material for predicting its service life under acid rain attack // npj Heritage Science. – 2023. – Vol. 11. – Art. 235.
5. A szervetlen savak (ásványi savak) oldódásos betonkorróziója // Vb. – 2019. – № 3. – P. 16–25.
6. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – № 12. – P. 2333–2339.
7. Acid attack on hydrated cement – Effect of mineral acids on the degradation process // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 74. – P. 35–43.
8. Corrosion resistance of cementitious composites exposed to acidic environments / V. Marcos-Meson [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 200. – P. 490–501.
9. Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычёв, В.В. Тимашев. – М. : Высшая школа, 1980. – 472 с.
10. Штарк Й. Долговечность бетона / Й. Штарк, Б. Вихт. – К. : Оранта, 2004. – 426 с.

References

1. Influence of the degree of incorporation of zeolite-containing raw material on the corrosion resistance of cement paste in a hydrochloric acid environment // News of Higher Educational Institutions. Construction. – 2014. – № 7. – P. 34–41.
2. DIN EN 206-1:2000. Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. – Berlin : Beuth Verlag, 2000.
3. Pavlík V. The rate of corrosion of hardened cement pastes and mortars in acid solutions / V. Pavlík, S. Unčík // Ceramics – Silikáty. – 1997. – Vol. 41. – № 2. – P. 53–58.
4. Macrokinetics of the deterioration of cement-based grouting material for predicting its service life under acid rain attack // npj Heritage Science. 2023. Vol. 11. Art. 235.
5. A szervetlen savak (ásványi savak) oldódásos betonkorróziója // Vb. – 2019. – № 3. – P. 16–25.
6. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35. – № 12. – P. 2333–2339.
7. Acid attack on hydrated cement – Effect of mineral acids on the degradation process // Cement and Concrete Research. – 2015. – Vol. 74. – P. 35–43.
8. Corrosion resistance of cementitious composites exposed to acidic environments / V. Marcos-Meson [et al.] // Construction and Building Materials. – 2019. – Vol. 200. – P. 490–501.
9. Butt Yu.M. Chemical Technology of Binder Materials / Yu.M. Butt, M.M. Sychev, V.V. Timashev. – M. : Vysshaya Shkola, 1980. – 472 p.
10. Stark J. Durability of Concrete / J. Stark, B. Vicht. – K. : Oranta, 2004. – 426 p.

УДК 624.012.45.004.69

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА БЕТОН

♦♦♦♦♦

EFFECT OF DYNAMIC LOADS ON CONCRETE

Баранова П.С.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
a_apollinaria_a@mail.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье систематизированы экспериментальные и теоретические данные о поведении бетона и железобетона при динамических нагрузках. Рассмотрена классификация динамических воздействий – однократных (ударных, взрывных) и многократных (циклических симметричных и несимметричных). Показано, что основным количественным показателем чувствительности бетона к скорости нагружения является коэффициент динамического упрочнения, отражающий рост прочности и модуля упругости с увеличением скорости деформации при неизменности предельных деформаций. Особое внимание уделено режимам комбинированного статико-динамического нагружения: установлено, что длительное предварительное обжатие на уровне 60 % от предела прочности повышает последующую динамическую прочность на 20–32 %, однако одновременно снижает деформативность и увеличивает хрупкость материала. Проанализированы математические модели динамического поведения бетона – модель Холмквиста-Джонсона-Кука, нелинейные вязкоупругие модели и метод дискретных элементов – с указанием ограничений и направлений модификации. Обоснована целесообразность комбинированного применения континуальных и дискретных подходов для повышения достоверности расчётов железобетонных конструкций.

Ключевые слова: бетон, железобетон, динамические нагрузки, коэффициент динамического упрочнения, скорость деформации, комбинированное нагружение, математическое моделирование.

Baranova P.S.
Student group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
a_apollinaria_a@mail.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor in the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
svusanov@gmail.com

Annotation. The article systematizes experimental and theoretical data on the behavior of concrete and reinforced concrete under dynamic loads. It examines the classification of dynamic actions, distinguishing between single events (impact, blast) and repeated events (symmetric and asymmetric cyclic loading). The dynamic strengthening coefficient is identified as the primary quantitative indicator of concrete's sensitivity to loading rate; this coefficient reflects the increase in strength and elastic modulus with rising strain rates, while ultimate strain values remain constant. Particular attention is paid to combined static-dynamic loading regimes: it is established that prolonged pre-compression at a level of 60 % of the ultimate strength increases subsequent dynamic strength by 20–32 %, though it simultaneously reduces deformability and increases material brittleness. Mathematical models of concrete's dynamic behavior-specifically the Holmquist-Johnson-Cook model, nonlinear viscoelastic models, and the discrete element method-are analyzed, with their limitations and potential modifications outlined. The article substantiates the benefits of combining continuum and discrete approaches to enhance the accuracy of reinforced concrete structure analysis.

Keywords: concrete, reinforced concrete, dynamic loads, dynamic enhancement factor, strain rate, combined loading, mathematical modeling.

Железобетонные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются широкому спектру нагрузок, среди которых динамические воздействия занимают особое место. К числу конструкций, испытывающих динамические нагрузки, относятся мосты и пролётные строения, подкрановые балки, фундаменты под машины с вращающимися и кривошипными механизмами, шпалы, сваи при забивке, а также элементы защитных сооружений, рассчитываемые на взрывные и ударные воздействия. Долговечность и надёжность таких конструкций в значительной мере определяются корректным учётом особенностей поведения бетона при динамическом нагружении.

В отличие от статического нагружения, динамическое воздействие характеризуется существенной скоростью приложения нагрузки, что обусловливает изменение прочностных и деформативных характеристик материала. Проблема усугубляется тем, что в реальных условиях конструкции часто эксплуатируются в режиме комбинированного нагружения, когда предвари-

тельная длительная статическая нагрузка изменяет исходные свойства бетона перед динамическим воздействием. Указанные обстоятельства определяют актуальность систематизации имеющихся экспериментальных и теоретических данных о поведении бетона при динамических нагрузках.

Вопросы динамического поведения бетона рассматривались в работах отечественных и зарубежных исследователей на протяжении нескольких десятилетий. Фундаментальные исследования Ю.М. Баженова, опубликованные в монографии 1970 года, заложили основу для понимания динамических свойств бетона при одноосном нагружении. В дальнейшем проблема разрабатывалась в трудах А.А. Гвоздева, Г.В. Беченевой, И.К. Белоброва, В.А. Рахманова, Г.В. Рыкова, Н.И. Попова, Б.С. Расторгуева и других исследователей.

Значительный вклад в изучение влияния скорости деформации на механические свойства бетона внесли японские исследователи Iwai, Yoshida, Nakamura и Wakabayashi (1982), которые выполнили комплексные экспериментальные исследования при монотонном и циклическом нагружении с заданной скоростью деформации в диапазоне от квазистатической (0,00002–0,00005 $с^{-1}$) до 0,10 $с^{-1}$. Ими было установлено, что прочность на сжатие, прочность на растяжение и модуль упругости бетона возрастают с увеличением скорости деформации, тогда как геометрия диаграммы деформирования практически не изменяется.

В работе К.А. Цветкова (МГСУ) отмечено, что для неоднородных материалов, к которым относится бетон, деформативно-прочностные характеристики зависят от вида напряжённого состояния и скорости приложения нагрузки. При этом подчёркивается, что остаются малоизученными вопросы поведения бетона при динамическом нагружении в условиях сложных напряжённых состояний, а имеющиеся зарубежные публикации носят ограниченный характер и зачастую противоречивы.

В исследовании С.Ю. Савина и М.З. Шарипова (2024) показано, что длительное нагружение бетона на уровне 0,6 от предела прочности оказывает положительное влияние на его прочность как при квазистатических, так и при динамических испытаниях, причём коэффициент динамического упрочнения достигает значений 1,20–1,32. Эти данные свидетельствуют о сложном характере влияния предварительной статической нагрузки на динамическую прочность бетона.

В работах, посвящённых моделированию динамического поведения бетона, широкое применение находит модель Холмквиста-Джонсона-Кука (HJC), однако существующие исследования преимущественно сосредоточены на численном моделировании при нормальных условиях, тогда как воздействие высоких температур остаётся недостаточно изученным. В ряде исследований указывается, что при скоростях деформации до 10^1 $с^{-1}$ эффект скорости деформации объясняется главным образом наличием свободной воды в бетоне (эффект Стефана), тогда как при более высоких скоростях определяющую роль начинают играть инерционные эффекты.

Классификация динамических нагрузок и режимов нагружения

Динамические нагрузки, воздействующие на бетонные и железобетонные конструкции, подразделяются на однократные и многократные.

Однократное динамическое воздействие включает:

– нагружение общего характера, при котором напряжения возрастают до максимальных значений за время 0,001–1 с;

– местное ударное нагружение, при котором время нагружения не превышает 0,01 с;

– взрывное воздействие, характеризующееся крайне высокой скоростью нагружения и вызывающее местные перегрузки и разрушение.

Многократное нагружение подразделяется на симметричные и несимметричные циклы. В первом случае в бетоне возникают напряжения одного знака (сжатие или растяжение), во втором – динамическая нагрузка изменяется во времени, вызывая напряжения разных знаков. Наиболее часто в практике встречается несимметричное циклическое нагружение с изменением нагрузки по синусоидальному закону.

Влияние скорости деформации на прочностные характеристики

Фундаментальной закономерностью динамического поведения бетона является повышение его прочности с ростом скорости деформации. Коэффициентом, количественно характеризующим этот эффект, служит коэффициент динамического упрочнения – отношение прочности бетона при динамическом нагружении к его статической прочности.

Экспериментальные исследования, проведённые на образцах-призмах тяжёлого цементного бетона класса В15, показали, что длительное предварительное обжатие существенно изменяет динамическую прочность материала. При этом с уменьшением времени воздействия (увеличением скорости нагружения) у предварительно обжатых образцов прочность повышается в меньшей степени, чем у контрольных образцов. Данный эффект объясняется тем, что

предварительная нагрузка вызывает перераспределение внутренних напряжений и уплотнение структуры, что снижает резерв структурных перестроек при динамическом воздействии.

В исследовании, проведённом в МГСУ, бетонные образцы размером 7×7×28 см с призменной статической прочностью R_β = 20,41 МПа подвергались динамическому нагружению со скоростью роста напряжений $\dot{\sigma}$ = 470 МПа/с. Полученные данные позволили оценить динамическую диаграмму деформирования и её отличия от статической.

Комбинированное статико-динамическое нагружение

Наиболее приближенным к реальным условиям эксплуатации является режим комбинированного нагружения, когда конструкция предварительно в течение длительного времени испытывает статическую нагрузку, а затем подвергается динамическому воздействию (например, при аварийных ситуациях).

Результаты экспериментов, проведённых исследователями НИУ МГСУ под руководством С.Ю. Савина, показали, что длительное нагружение бетонных образцов в течение 180 дней на уровне 60 % от ожидаемого предела прочности положительно влияет на прочность бетона как при статических, так и при динамических испытаниях. Прочность образцов, подвергнутых предварительной длительной нагрузке, увеличилась на 7–10 % при статических испытаниях и на 20–32 % – при динамических. Коэффициент упрочнения при квазистатических испытаниях составил 1,07–1,10, при динамических – 1,20–1,32 в зависимости от серии образцов.

Указанный эффект связывается с более равномерным перераспределением внутренних напряжений в материале и уменьшением напряжений в зонах контакта между компонентами бетона. Однако при этом бетон становится более жёстким и хрупким, то есть хуже выдерживает деформации при внезапных нагрузках. Таким образом, повышение прочности сопровождается снижением деформативности, что необходимо учитывать при проектировании конструкций на прогрессирующее обрушение.

Деформативные характеристики при динамическом нагружении

Вопросы деформирования бетона при динамических нагрузках изучены в меньшей степени, чем прочностные характеристики. В обзоре К.А. Цветкова отмечается, что до сих пор отсутствует единое мнение о влиянии скорости роста напряжений на коэффициент поперечных деформаций и предельные деформации. Не решёнными остаются вопросы математического описания динамической диаграммы деформирования бетона и определения зависимостей модуля продольных деформаций от скорости нагружения.

Исследования японских авторов показали, что при увеличении скорости деформации возрастает не только прочность, но и модуль упругости бетона, тогда как деформации, соответствующие максимальному напряжению, практически не зависят от скорости деформации. Это указывает на то, что динамическое нагружение изменяет преимущественно силовые, а не деформативные характеристики материала.

Таблица 1 – Влияние предварительного длительного нагружения на динамическую прочность бетона (по данным [7])

Серия образцов	Коэффициент упрочнения при квазистатических испытаниях	Коэффициент динамического упрочнения
1-я серия	1,07	1,20
2-я серия	1,10	1,32

Таблица 2 – Сравнение прочностных характеристик бетона при статическом и динамическом нагружении (по данным [3, 6])

Режим нагружения	Предел прочности при сжатии, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация при максимуме напряжения, ‰
Статическое нагружение (квазистатическое, $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-5}$ с$^{-1}$)	20,0–25,0	25–30	2,0–2,5
Динамическое нагружение ($\dot{\varepsilon} \approx 10^{-1}$ с$^{-1}$)	28,0–35,0	32–38	2,1–2,6

Примечание: значения приведены для тяжёлого бетона класса В15–В25 при одноосном сжатии.

Математическое моделирование динамического поведения бетона

Для расчёта железобетонных конструкций на динамические нагрузки применяются различные математические модели. Наиболее распространённой является модель Холмквиста-Джонсона-Кука (HJC), которая стала одной из базовых в области динамической механики хрупких материалов [8, 9]. Модель включает уравнение состояния, поверхность текучести и крите-

рий накопления повреждений, что позволяет описывать поведение бетона в широком диапазоне скоростей деформации и давлений.

Однако существующие модели преимущественно ориентированы на нормальные условия эксплуатации. Для учёта воздействия высоких температур в работе [9] предложена модификация модели HJC путём введения поправочного коэффициента повреждения K(Q*), зависящего от температуры. Это позволяет рассчитывать динамическую прочность бетона после высокотемпературного нагрева, что актуально для конструкций, эксплуатируемых в условиях пожароопасных производств или подверженных термическим ударам.

В работе С.Ю. Савина и М.З. Шарипова [7] предложена нелинейная вязкоупругая модель, учитывающая как долговременные деформации бетона (ползучесть и усадку), так и его реакцию на динамические нагрузки. Модель реализована в два этапа: на первом рассчитываются деформации под действием статической нагрузки с учётом старения материала, на втором – оценивается динамическое поведение с учётом предшествующей длительной нагрузки [7].

Альтернативным подходом является использование метода дискретных элементов [10], который, в отличие от континуальных методов, не требует априорных предположений о положении и развитии трещин и хорошо адаптирован к динамическим задачам с высокими скоростями деформации. Метод дискретных элементов позволяет непосредственно моделировать зарождение, рост и слияние микротрещин, что даёт более реалистичную картину разрушения бетона при ударных и взрывных воздействиях [10].

Динамические нагрузки, воздействующие на бетонные и железобетонные конструкции, классифицируются по времени нагружения (однократные и многократные) и характеру изменения напряжений (симметричные и несимметричные циклы). Основным количественным показателем чувствительности бетона к динамическому воздействию является коэффициент динамического упрочнения, определяемый как отношение динамической прочности к статической.

Установлено, что прочность бетона при сжатии и растяжении, а также модуль упругости возрастают с увеличением скорости деформации. Деформации, соответствующие максимальному напряжению, при этом существенно не изменяются, что указывает на преимущественное влияние скорости нагружения на силовые, а не на деформативные характеристики материала.

Длительное предварительное статическое нагружение бетона на уровне 60 % от предела прочности приводит к повышению его прочности при последующем динамическом воздействии на 20–32 % по сравнению с образцами без предварительной нагрузки. Однако это сопровождается снижением деформативности и повышением хрупкости материала, что требует обязательного учёта при проектировании конструкций на прогрессирующее обрушение.

Существующие математические модели динамического поведения бетона, включая модель Холмквиста-Джонсона-Кука и нелинейные вязкоупругие модели, позволяют с приемлемой точностью описывать поведение материала в широком диапазоне скоростей деформации. Для учёта дополнительных факторов (высокотемпературное воздействие, сложные напряжённые состояния, предварительное длительное нагружение) требуется их дальнейшая модификация и верификация на основе экспериментальных данных.

Для повышения достоверности расчётов железобетонных конструкций на динамические нагрузки целесообразно комбинированное применение континуальных моделей (для оценки напряжённо-деформированного состояния в целом) и дискретных методов (для моделирования локального разрушения при высокоскоростных воздействиях).

Литература

1. Влияние динамических нагрузок на бетон // Молодой учёный. – 2022. – № 447. – С. 44–47.
2. Цветков К.А. Основные результаты экспериментально-теоретических исследований прочностных и деформативных свойств бетона при динамическом нагружении в условиях одноосного и двухосного сжатия // Научные труды МГСУ. – М. : Издательство МГСУ, 2021. – С. 1–5.
3. Шаумаров Н.Б. Прочность и деформации предварительно обжатого тяжёлого бетона при воздействии динамических нагрузок / Н.Б. Шаумаров, У.Х. Абдуллаев // Вестник Ташкентского государственного транспортного университета. – 2024. – № 2. – С. 45–52. – DOI: 10.5281/zenodo.10939724
4. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. – М. : Стройиздат, 1970. – 271 с.
5. Рахманов В.А. Динамическая прочность бетона // Бетон и железобетон. – 1978. – № 6. – С. 12–15.
6. Yoshida N. Effects of Loading Rate on the Performance of Structural Elements: Part I Effects of the Strain Rate on Stress-Strain Relationships of Concrete and Steel / N. Yoshida, S. Iwai, T. Nakamura, M. Wakabayashi // Transactions of the Architectural Institute of Japan. – 1982. – № 314. – С. 102–112. – DOI: 10.3130/aijsaxx.314.0_102

7. Savin S.Yu. Dynamic Performance of Concrete Considering Initial Stresses and Creep / S.Yu. Savin, M.Z. Sharipov // Reinforced Concrete Structures. – 2024. – № 3. – P. 24–33.
8. Holmquist T.J. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures / T.J. Holmquist, G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. – Québec, 1993. – P. 591–600.
9. Research on the impact compressive mechanical properties of concrete after high-temperature exposure // Journal of Cleaner Production. – 2026. – Vol. 412. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2026. 141630
10. Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates // Computers & Structures. – 2004. – Vol. 82. – № 23–26. – P. 2077–2088. – DOI: 10.1016/j.compstruc. 2004.03.077

References

1. The Influence of Dynamic Loads on Concrete // Young Scientist. – 2022. – № 447. – P. 44–47.
2. Tsvetkov K.A. Key Results of Experimental and Theoretical Studies on the Strength and Deformation Properties of Concrete Under Dynamic Loading in Conditions of Uniaxial and Biaxial Compression // Scientific Works of MGSU. – M. : MGSU Publishing House, 2021. – P. 1–5.
3. Shaumarov N.B. Strength and Deformations of Precompressed Heavy Concrete under Dynamic Loads / N.B. Shaumarov, U.Kh. Abdullaev // Bulletin of the Tashkent State Transport University. – 2024. – № 2. – P. 45–52. DOI: 10.5281/zenodo.10939724
4. Bazhenov Yu.M. Concrete under dynamic loading. – M. : Stroyizdat, 1970. – 271 p.
5. Rakhmanov V.A. Dynamic strength of concrete // Concrete and reinforced concrete. – 1978. – № 6. – P. 12–15.
6. Yoshida N. Effects of Loading Rate on the Performance of Structural Elements: Part I Effects of the Strain Rate on Stress-Strain Relationships of Concrete and Steel / N. Yoshida, S. Iwai, T. Nakamura, M. Wakabayashi // Transactions of the Architectural Institute of Japan. – 1982. – № 314. – C. 102–112. DOI: 10.3130/aijsaxx.314.0_102
7. Savin S.Yu. Dynamic Performance of Concrete Considering Initial Stresses and Creep / S.Yu. Savin, M.Z. Sharipov // Reinforced Concrete Structures. – 2024. – № 3. – P. 24–33.
8. Holmquist T.J. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures / T.J. Holmquist, G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics. – Québec, 1993. – P. 591–600.
9. Research on the impact compressive mechanical properties of concrete after high-temperature exposure // Journal of Cleaner Production. – 2026. – Vol. 412. DOI: 10.1016/j.jclepro.2026. 141630
10. Discrete element modelling of concrete submitted to dynamic loading at high strain rates // Computers & Structures. – 2004. – Vol. 82. – № 23–26. – P. 2077–2088. DOI: 10.1016/j.compstruc. 2004.03.077

УДК 624.012.45.004.69

О ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

♦♦♦♦♦

ON THE APPROACH TO MODELING HIGH-STRENGTH CONCRETE

Баранова П.С.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
a_apollinaria_a@mail.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены особенности численного моделирования высокопрочного бетона (классов В60–В100 и выше) в рамках метода конечных элементов. Проанализированы основные конститутивные модели, применяемые для описания нелинейного поведения бетона при статических и динамических нагрузках: модель Concrete Damaged Plasticity (CDP), модель Друкера-Прагера, модель микротрещинообразования (smeared crack), а также деформационная модель по СП 63.13330.2018 и конститутивные зависимости fib Model Code 2010. Показано, что высокопрочный бетон отличается от бетона обычной прочности повышенной хрупкостью, большей линейностью диаграммы деформирования, малыми предельными деформациями сжатия и высоким модулем упругости. Обсуждается влияние параметров CDP-модели (угол дилатансии, отношение прочностей при двухосном и одноосном сжатии, коэффициент Kc, коэффициент передачи сдвига) на точность расчёта. Установлено, что результаты численного моделирования наиболее чувствительны к модулю упругости и параметру трещинообразования в растянутой зоне. Предложены рекомендации по верификации моделей на основе экспериментальных данных.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, численное моделирование, метод конечных элементов, Concrete Damaged Plasticity, диаграмма деформирования, хрупкость, угол дилатансии.

Baranova P.S.
Student group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
a_apollinaria_a@mail.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor in the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
svusanov@gmail.com

Annotation. The article discusses the features of numerical modeling of high-strength concrete (grades B60–B100 and above) within the finite element method. The main constitutive models used to describe the nonlinear behavior of concrete under static and dynamic loads are analyzed: Concrete Damaged Plasticity (CDP), Drucker-Prager model, smeared crack model, as well as the deformation model according to SP 63.13330.2018 and the constitutive relations of fib Model Code 2010. It is shown that high-strength concrete differs from normal-strength concrete by increased brittleness, greater linearity of the stress–strain diagram, small ultimate compressive strains, and a high elastic modulus. The influence of CDP model parameters (dilation angle, biaxial-to-uniaxial compressive strength ratio, Kc coefficient, shear retention factor) on the accuracy of analysis is discussed. It is found that the numerical results are most sensitive to the elastic modulus and the crack modeling parameter in the tension zone. Recommendations for model verification based on experimental data are proposed.

Keywords: high-strength concrete, numerical modeling, finite element method, Concrete Damaged Plasticity, deformation diagram, brittleness, dilation angle.

Высокопрочный бетон (ВПБ) – материал с прочностью на сжатие от 60 МПа и выше – находит всё более широкое применение в высотном строительстве, мостостроении и при возведении большепролётных конструкций. Однако расширяющееся использование ВПБ ставит перед инженерами задачу корректного описания его механического поведения в расчётных моделях. В отличие от бетона обычной прочности, ВПБ обладает повышенным модулем упругости, большей хрупкостью и существенно меньшими предельными деформациями сжатия, что делает прямое перенесение моделей, верифицированных на обычном бетоне, некорректным [1; 2].

В нормативных документах для ВПБ предусматриваются увеличенные коэффициенты безопасности, а подходы к расчёту остаются теми же, что и для обычных бетонов [3]. Это создаёт запас прочности, но не отражает реальной картины напряжённо-деформированного состояния, особенно в нелинейной стадии работы. Численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) позволяет уточнить поведение конструкций из ВПБ, однако требует тщательного выбора конститутивной модели материала и её параметров [4; 5].

Цель настоящей работы – систематизировать данные о применении конститутивных моделей бетона для моделирования высокопрочного бетона, выявить ключевые параметры, влияющие на точность расчёта, и сформулировать рекомендации по их настройке.

Особенности высокопрочного бетона как объекта моделирования

Высокопрочный бетон характеризуется рядом отличий от бетона обычной прочности, существенных для моделирования. Во-первых, диаграмма деформирования ВПБ при сжатии существенно более линейна: нисходящий участок после пика напряжений выражен слабо или отсутствует, а предельные деформации сжатия составляют 2,0–2,5‰ против 3,5‰ у обычного бетона [1; 6]. Во-вторых, модуль упругости ВПБ достигает 40–50 ГПа, что примерно в 1,5 раза выше, чем у бетона класса В25 [7]. В-третьих, ВПБ обладает повышенной хрупкостью: отношение прочности на растяжение к прочности на сжатие снижается с ростом класса бетона, а критический коэффициент интенсивности напряжений KIC возрастает, но характеристическая длина трещины уменьшается [8; 9].

Эти факторы приводят к тому, что при моделировании ВПБ необходимо учитывать:

1) ограниченную способность к перераспределению напряжений вследствие хрупкого разрушения;

2) высокую чувствительность несущей способности к эксцентриситету приложения нагрузки и гибкости элемента [10];

3) необходимость точного задания диаграммы деформирования, включая параметры нисходящего участка и предельные деформации.

Конститутивные модели для описания поведения бетона

Для моделирования нелинейного поведения бетона в программных комплексах МКЭ (ABAQUS, ANSYS, ATENA и др.) применяются различные конститутивные модели. Основные из них приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение конститутивных моделей бетона

Модель	Программная реализация	Критерий прочности	Особенности применения
CDP (Lubliner-Lee-Fenves)	ABAQUS	Модифицированный Drucker-Prager	Учёт повреждений при растяжении и сжатии, восстановление жёсткости
Drucker-Prager	ABAQUS, ANSYS	Конус Друкера-Прагера	Простота настройки, ограниченная точность для сложных напряжённых состояний
Willam-Warnke	ANSYS (SOLID65)	Пятипараметрический	Хорошее соответствие опытам при двух- и трёхосном сжатии
CC3DNonLinCementitious2	ATENA	Модель трещинообразования (smeared crack)	Детальный учёт трещин, сцепления арматуры
Деформационная модель (СП 63)	Расчётные комплексы РФ	Нелинейные диаграммы σ–ε	Нормативная база РФ, двух- и трёхлинейные диаграммы

Модель Concrete Damaged Plasticity (CDP), разработанная Дж. Люблинером и дополненная Дж. Ли и Г. Фенвесом, является наиболее распространённой для нелинейного анализа железобетонных конструкций в ABAQUS [11; 12]. Она объединяет пластичность, основанную на модифицированном критерии Друкера-Прагера, с независимыми переменными повреждения при растяжении (dt) и сжатии (dc). Ключевое преимущество CDP – возможность моделировать восстановление жёсткости при закрытии трещин под действием сжимающих напряжений [13].

Деформационная модель, принятая в СП 63.13330.2018, основана на использовании нелинейных диаграмм деформирования бетона $\sigma = f(\varepsilon)$ при сжатии и растяжении [14]. Согласно нормам, для ВПБ применяются двухлинейные и трёхлинейные диаграммы с указанием предельных относительных деформаций сжатия ε_{b2} и растяжения ε_{bt2}. В fib Model Code 2010 [15] используется аналогичная криволинейная зависимость, близкая к выражению Eurocode 2, с корректировкой коэффициента k в зависимости от прочности бетона.

Параметры модели CDP и их влияние на результаты расчёта

При настройке CDP-модели в ABAQUS задаются следующие основные параметры: угол дилатансии ψ, эксцентриситет e, отношение пределов прочности при двухосном и одноосном сжатии fb0 / fc0, коэффициент Kc, а также диаграммы напряжений–деформаций и параметров повреждения при растяжении и сжатии [11; 13]. Рекомендуемые значения параметров для высокопрочного бетона приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Рекомендуемые параметры CDP для высокопрочного бетона

Параметр	Обычный бетон	Высокопрочный бетон	Источник
Угол дилатансии ψ, град	30–35	38–45	[11; 16]
Эксцентриситет e	0,1	0,1	[11]
fb0 / fc0	1,16	1,16	[11; 13]
Kc	0,667 (2/3)	0,667 (2/3)	[11; 13]
Коэффициент передачи сдвига (βt)	0,2–0,5	0,3–0,5	[4; 5]

Угол дилатансии ψ определяет объёмное расширение материала при сдвиговом разрушении. Для обычного бетона рекомендуются значения 30–35°, однако для ВПБ ряд исследователей предлагает более высокие значения – 38–45°, что отражает меньшую пластичность и более выраженное dilatant поведение [11; 16]. При моделировании балок из ВПБ значение ψ = 45° даёт наилучшее соответствие экспериментальным кривым нагрузка-прогиб [16].

Коэффициент передачи сдвига для открытой трещины (βt) существенно влияет на поведение модели после образования первых трещин. В работе [4] на основе верификации трёхмерных моделей балок из бетона прочностью 81,2 МПа установлено, что значение βt = 0,5 обеспечивает наилучшее совпадение с экспериментальными данными, тогда как при βt = 0,2 жёсткость конструкции занижается, а при βt = 1,0 – завышается.

Модуль упругости является одним из наиболее значимых параметров: по данным [4], при моделировании балок из ВПБ расчёт по формуле ACI 363 даёт кривую нагрузки-прогиб, наилучшим образом соответствующую эксперименту, тогда как формула ACI 318 (для обычного бетона) приводит к занижению жёсткости на 15–20%. Это подтверждает необходимость использования зависимостей модуля упругости, специфичных именно для высокопрочного бетона.

Факторы, влияющие на точность моделирования

На точность численного моделирования конструкций из ВПБ влияет совокупность факторов:

1. Размер конечного элемента. При использовании CDP-модели результаты существенно зависят от размера сетки: при измельчении элементов с 75 до 25 мм картина трещинообразования становится более детальной, однако сходимость итерационного процесса ухудшается [12]. Рекомендуется принимать характерный размер элемента не более 2–3 диаметров максимального заполнителя.

2. Тип диаграммы деформирования в растянутой зоне. В ABAQUS доступны три способа описания поведения бетона при растяжении: через напряжения-деформации, через напряжения – раскрытие трещины и через энергию разрушения. Трилинейная модель (напряжения-деформации) даёт результаты, наиболее близкие к экспериментальным данным при динамических нагрузках [13].

3. Метод решения нелинейных уравнений. Для задач со значительной нелинейностью (характерной для ВПБ из-за хрупкого разрушения) применение модифицированного алгоритма Рикса в ABAQUS/Standard обеспечивает лучшую сходимость, чем классический метод Ньютона-Рафсона [5]. При больших амплитудах нагрузки, когда неявный метод не сходится, целесообразно использование явных схем ABAQUS/Explicit с квазистатической постановкой задачи.

4. Верификация модели. Обязательным этапом является сравнение результатов численного расчёта с экспериментальными данными – кривыми нагрузки-прогиба, картинами трещинообразования, значениями предельной несущей способности. По данным [4; 17], при корректной настройке параметров CDP отклонение численных результатов от экспериментальных составляет 3–8 % по несущей способности и менее 10 % по прогибам.

Высокопрочный бетон как объект моделирования отличается от обычного бетона повышенной хрупкостью, большей линейностью диаграммы деформирования, высоким модулем упругости и малыми предельными деформациями сжатия. Эти особенности требуют использования. конститутивных моделей с параметрами, настроенными специально для ВПБ.

Среди рассмотренных моделей наибольшими возможностями для описания поведения ВПБ обладает модель CDP, позволяющая учитывать повреждения при растяжении и сжатии, а также восстановление жёсткости при закрытии трещин. Деформационная модель по СП 63.13330.2018 и зависимости fib Model Code 2010 применимы для аналитических расчётов, но не отражают полностью картину трещинообразования.

На точность моделирования наибольшее влияние оказывают модуль упругости, угол дилатансии и коэффициент передачи сдвига. Для ВПБ рекомендуются угол дилатансии 38–45° и коэффициент передачи сдвига 0,3–0,5. Модуль упругости следует определять по формулам, учитывающим повышенную прочность бетона (например, ACI 363).

Обязательным условием корректного моделирования является верификация на основе экспериментальных данных. При правильной настройке параметров отклонение расчётных значений несущей способности и прогибов от опытных не превышает 8 и 10 % соответственно.

Перспективным направлением является развитие моделей, учитывающих масштабный эффект при хрупком разрушении ВПБ, а также применение машинного обучения для идентификации параметров конститутивных моделей на основе экспериментальных баз данных.

Литература

1. Опыт и перспективы использования высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов // Modern Applied Science. – 2017. – № 2. – URL : https://web.snauka.ru/issues/2017/02/78781
2. Влияние разных факторов на работу железобетонных колонн из высокопрочных бетонов // Науковедение. – 2013. – № 5. – 12 с.
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М. : Минстрой России, 2018. – 154 с.
4. О верификации экспериментальных данных с результатами численного моделирования (обзор зарубежного опыта) // Молодой учёный. – 2023. – № 49. – С. 101–106.
5. Лукин А.В. Моделирование железобетонных конструкций в программной системе ABAQUS / А.В. Лукин, В.С. Модестов // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 4. – С. 88–98.
6. Обзор существующих диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных нормативных документах // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 3. – С. 80–84.
7. Свойства и характеристики бетона: 10 ключевых параметров // Элкон. – URL : https:// www.elkon.ru/blog/view/27
8. Критерии хрупкости высокопрочного конструкционного бетона при воздействии высоких температур // Труды БГТУ. – 2017. – № 2. – С. 56–60.
9. ГОСТ 29167-2020. Бетоны. Методы испытаний на трещиностойкость при механическом нагружении. – М. : Стандартинформ, 2020.
10. Finite element modeling of high-strength reinforced concrete slabs / N. Krstulovic-Opara [et al.] // ResearchGate. – 2019. – P. 1–15.
11. A plastic-damage model for concrete / J. Lubliner [et al.] // International Journal of Solids and Structures. – 1989. – Vol. 25. – № 3. – P. 299–326.
12. Пудьяков А.А. Моделирование динамического поведения железобетонных конструкций методом конечных элементов: бакалавр. работа. – СПб. : СПбГПУ, 2015. – 67 с.
13. Employment of damage plasticity constitutive model for concrete subjected to impact load // EAI Endorsed Transactions. – 2020. – Vol. 7. – № 26. – P. 1–10.
14. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / Fédération Internationale du Béton. – Lausanne : Ernst & Sohn, 2013. – 434 p.
15. Обзор и сравнительный анализ критериев прочности для моделирования нелинейного поведения бетона // Building and Reconstruction. – 2024. – № 4. – С. 45–57.
16. Finite element analysis of high-strength concrete beams under shear loading // Int. Conf. on Emerging Trends in Civil Engineering. – 2014. – P. 681–687.
17. Finite element analysis of flexural behavior in ultra-high-strength concrete beams with BFRP and hybrid BFRP-steel reinforcement // Frontiers in Materials. – 2026. – Vol. 13. – P. 1–14.

References

1. Experience and Prospects for the Use of High-Strength and Ultra-High-Strength Concretes // Modern Applied Science. – 2017. – № 2. – URL : https://web.snauka.ru/issues/2017/02/78781
2. The Influence of Various Factors on the Performance of Reinforced Concrete Columns Made of High-Strength Concrete // Naukovedenie (Science Studies). – 2013. – № 5. – 12 p.
3. SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. General Provisions. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018. – 154 p.
4. On the Verification of Experimental Data with Numerical Modeling Results (A Review of International Experience) // Young Scientist. – 2023. – № 49. – P. 101–106.
5. Lukin A.V. Modeling of Reinforced Concrete Structures in the ABAQUS Software System / A.V. Lukin, V.S. Modestov // Magazine of Civil Engineering. – 2015. – № 4. – P. 88–98.
6. A Review of Existing Concrete Stress-Strain Diagrams under Compression in Domestic and International Regulatory Documents // Industrial and Civil Engineering. – 2014. – № 3. – P. 80–84.
7. Properties and characteristics of concrete: 10 key parameters // Elkon. – URL : https://www. elkon.ru/blog/view/27
8. Brittleness criteria for high-strength structural concrete under exposure to high temperatures // Proceedings of BSTU. – 2017. – № 2. – P. 56–60.
9. GOST 29167-2020. Concretes. Test methods for crack resistance under mechanical loading. – M. : Standartinform, 2020.

10. Finite element modeling of high-strength reinforced concrete slabs / N. Krstulovic-Opara [et al.] // ResearchGate. – 2019. – P. 1–15.
11. A plastic-damage model for concrete / J. Lubliner [et al.] // International Journal of Solids and Structures. – 1989. – Vol. 25. – № 3. – P. 299–326.
12. Pudyakov A.A. Modeling the Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Structures Using the Finite Element Method: Bachelor's Thesis. – SPb. : SPbGPU, 2015. – 67 p.
13. Employment of damage plasticity constitutive model for concrete subjected to impact load // EAI Endorsed Transactions. – 2020. – Vol. 7. – № 26. – P. 1–10.
14. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / Fédération Internationale du Béton. – Lausanne : Ernst & Sohn, 2013. – 434 p.
15. Overview and comparative analysis of strength criteria for modeling the nonlinear behavior of concrete // Building and Reconstruction. – 2024. – № 4. – P. 45–57.
16. Finite element analysis of high-strength concrete beams under shear loading // Int. Conf. on Emerging Trends in Civil Engineering. – 2014. – P. 681–687.
17. Finite element analysis of flexural behavior in ultra-high-strength concrete beams with BFRP and hybrid BFRP-steel reinforcement // Frontiers in Materials. – 2026. – Vol. 13. – P. 1–14.

УДК 624.012.45.004.69

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ ПАДЕНИЯ ГРУЗА НА ПРОДАВЛИВАНИЕ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

♦♦♦♦♦

INFLUENCE OF DROP HEIGHT ON PUNCHING SHEAR OF FLAT SLABS

Баранова П.С.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
a_apollinaria_a@mail.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено влияние высоты падения груза на несущую способность железобетонных безбалочных перекрытий при продавливании. Выполнен сравнительный анализ двух методов расчёта – квазистатического и прямого динамического – при трёх значениях высоты падения груза: 0,5; 2,0 и 3,0 м. Показано, что с увеличением высоты падения груза дифференциация результатов, полученных различными методами, уменьшается: с 15 % при высоте 0,5 м до 5 % при высоте 3,0 м. Установлен скачкообразный характер зависимости коэффициента использования сечения от высоты падения груза: при уменьшении высоты в 2 раза коэффициент снижается на 62 %, при увеличении в 2 раза – на 34 %. Проанализированы результаты экспериментальных исследований отечественных и зарубежных авторов, подтверждающие, что с ростом скорости нагружения прочность на продавливание возрастает, а деформационная способность снижается. Обоснована необходимость учёта высоты падения груза как ключевого параметра при проектировании безбалочных перекрытий, подверженных ударным воздействиям.

Ключевые слова: безбалочные перекрытия, продавливание, ударная нагрузка, высота падения груза, динамический расчёт, квазистатический метод, коэффициент использования сечения.

Baranova P.S.
Student group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
a_apollinaria_a@mail.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor in the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State University of Technology
svusanov@gmail.com

Annotation. The article examines the influence of drop height on the load-bearing capacity of reinforced concrete flat slabs under punching shear. A comparative analysis of two calculation methods – quasi-static and direct dynamic – was performed for three drop heights: 0.5, 2.0, and 3.0 m. It is shown that with increasing drop height, the discrepancy between results obtained by different methods decreases: from 15 % at 0.5 m to 5 % at 3.0 m. A stepwise character of the relationship between the section utilization coefficient and drop height was established: a twofold decrease in height reduces the coefficient by 62 %, while a twofold increase reduces it by 34 %. Experimental results of domestic and foreign authors confirming that punching shear strength increases with loading rate while deformation capacity decreases are analyzed. The necessity of accounting for drop height as a key parameter in the design of flat slabs subjected to impact loading is substantiated.

Keywords: flat slabs, punching shear, impact load, drop height, dynamic analysis, quasi-static method, section utilization coefficient.

Безбалочные монолитные перекрытия широко применяются в современном строительстве благодаря простоте конструктивного решения, снижению строительной высоты этажа и возможности гибкой планировки помещений. Однако узлы сопряжения плиты с колонной являются наиболее уязвимыми элементами таких конструкций: разрушение от продавливания носит хрупкий характер и приводит к внезапной потере несущей способности, что может стать причиной прогрессирующего обрушения здания [1, 7].

Особую актуальность проблема продавливания приобретает при действии динамических нагрузок – ударных и взрывных воздействий, падения обломков конструкций, аварийных ситуаций на опасных производственных объектах. В отличие от статического нагружения, при ударном воздействии несущая способность плиты на продавливание существенно зависит от скорости приложения нагрузки, которая, в свою очередь, определяется высотой падения груза. Несмотря на значительное число исследований, посвящённых продавливанию при статическом нагружении, вопрос сопротивления плит продавливанию при динамическом воздействии в нормативных документах практически не освещён [12, 20, 21].

Цель настоящей работы – анализ влияния высоты падения груза на несущую способность безбалочных перекрытий при продавливании и оценка сходимости результатов, полученных квазистатическим и прямым динамическим методами расчёта.

Методы расчёта на продавливание при динамическом воздействии

В действующих нормативных документах СП 63.13330.2018 расчёт на продавливание регламентирован только для статических нагрузок [2]. Предполагается, что продавливание происходит по боковой поверхности пирамиды, боковые грани которой наклонены под углом 45° к горизонтали. Прочность проверяется по условию, в котором продавливающая сила не должна превышать предельного усилия, воспринимаемого бетоном и поперечной арматурой [3, 4].

При динамическом нагружении для определения напряжённо-деформированного состояния конструкции применяются два основных подхода. Первый – квазистатический метод, основанный на энергетическом балансе (метод Кокса), при котором динамическая нагрузка заменяется эквивалентной статической посредством коэффициента динамичности [21]. Второй – прямой динамический расчёт путём численного интегрирования уравнений движения, реализуемый в программных комплексах (SCAD++, Лира-САПР, ABAQUS) [5, 19].

Сложность расчёта на продавливание при динамических воздействиях обусловлена не только многофакторностью процессов, возникающих в железобетоне при ударе, но и отсутствием в нормативных документах методик, позволяющих определять величину несущей способности плиты при динамическом нагружении как в российских, так и в зарубежных нормах [12, 18].

Численный эксперимент

В рамках численного эксперимента была рассмотрена конечно-элементная модель фрагмента монолитного безбалочного перекрытия. Параметры модели: сетка колонн 6 × 6 м, толщина плиты 200 мм, сечение колонн 400 × 400 мм, бетон класса В25, продольная арматура класса А500. Поперечное армирование принято стержнями диаметром 12 мм из стали А500 с шагом 60 мм, расположенными равномерно вдоль контура расчётного поперечного сечения [5].

В качестве динамической нагрузки принята ударная нагрузка от падения тела массой 5,0 т. Высота падения груза – переменная характеристика; принято три значения:

1) менее стороны расчётного контура продавливания (0,58 м) – h = 0,5 м;
2) менее периметра расчётного контура продавливания (2,32 м) – h = 2,0 м;
3) более периметра расчётного контура продавливания – h = 3,0 м.

Расчёт узла сопряжения колонны и безбалочного перекрытия выполнен в два этапа: на первом этапе определено напряжённо-деформированное состояние конструкции квазистатическим методом и прямым динамическим расчётом, на втором – выполнена проверка несущей способности на продавливание по методике СП 63.13330.2018 с использованием полученных усилий [5, 21].

Таблица 1 – Результаты расчёта перекрытия на продавливание при различной высоте падения груза

Параметр	Квазистатический метод	Прямой динамический расчёт
Высота падения h = 0,5 м		
Максимальное перемещение плиты, мм	33,27	30,36
Максимальное продольное усилие N, т	–	–
Коэффициент использования сечения	0,382	0,325
Расхождение результатов	15 %	15 %
Высота падения h = 2,0 м		
Максимальное перемещение плиты, мм	59,34	57,46
Коэффициент использования сечения	0,252	0,235
Расхождение результатов	7 %	7 %
Высота падения h = 3,0 м		
Максимальное перемещение плиты, мм	71,08	69,70
Коэффициент использования сечения	0,200	0,190
Расхождение результатов	5 %	5 %

Анализ результатов

По результатам расчётов, представленных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что при уменьшении высоты падения груза в 2 раза (с 1,0 м до 0,5 м) при прочих равных условиях

расхождение результатов, полученных двумя методами, увеличилось с 11 % до 15 %. При увеличении высоты падения в 2 раза (с 1,0 м до 2,0 м) расхождение уменьшилось с 11 % до 7 %. При увеличении высоты падения в 3 раза (с 1,0 м до 3,0 м) расхождение уменьшилось с 11 % до 5 % [5].

Таким образом, с ростом высоты падения груза сходимость результатов, полученных квазистатическим и прямым динамическим методами, улучшается. Это объясняется тем, что при больших высотах падения энергия удара значительно превосходит собственную энергию деформации конструкции, и инерционные эффекты начинают доминировать, что сглаживает различия между методами [6, 7].

Анализ зависимости коэффициента использования сечения от высоты падения груза показал её скачкообразный характер. При увеличении высоты падения в 2 раза коэффициент использования уменьшается на 34 %, а при уменьшении высоты в 2 раза – на 62 %. При увеличении высоты падения с 1,0 м до 3,0 м уменьшение коэффициента использования сечения составило 21 %. Наибольшая дифференциация значений по методам достигается при высоте падения 1,0 м и составляет 11 % [5].

Полученные результаты согласуются с данными экспериментальных исследований. В работе [6] установлено, что ударная нагрузка при высоте падения 1,2 м вызывает деградацию несущей способности на продавливание на 30,5 %, а при высоте 2,4 м – на 34,6 %. При высоте падения более 10 м (кинетическая энергия 686 Дж) разрушение наблюдалось для плит с объёмным содержанием фибры менее 0,7 %, а при высоте 11 м (754 Дж) разрушались все испытанные образцы [6].

В исследовании [5] на основании экспериментов с падением груза массой 450 кг с высоты 30 м на плиту толщиной 0,28 м зафиксировано время контакта 3,5 м/с и максимальная контактная сила 5 МН. Показано, что при большей высоте падения жёсткость системы существенно выше, что подтверждается экспериментальными наблюдениями. Установлено, что прочность на продавливание заметно возрастает только при скоростях деформации свыше 100 $с^{-1}$ [5].

Существенное влияние на характер разрушения оказывает также масса падающего груза. В работе [18] показано, что при увеличении массы груза в 2 раза коэффициент использования сечения уменьшается на 11 %, а при уменьшении массы в 2 раза – на 72 %. Расхождение результатов двух методов при варьировании массы составляет от 7 % до 50 %, причём наибольшая дифференциация достигается при минимальной массе груза (2,5 т) [18].

Экспериментальные данные отечественных исследователей

В.В. Крыловым [12] была разработана программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении. Испытания проводились на копровой установке с варьированием толщины плитной части (100 и 120 мм) и класса бетона (В15 и В20). Всего было испытано 12 образцов при кратковременном динамическом нагружении и 4 образца при статическом. Установлено, что разрушение образцов происходит по типу продавливания независимо от скорости нагружения, однако при динамическом воздействии наблюдается снижение площади поверхности продавливания [12, 20].

В исследовании [21] выполнена проверка несущей способности монолитной железобетонной плиты размером 1500 × 1500 мм, толщиной 200 мм из бетона класса В25 при динамическом нагружении в виде падения груза массой 510 кг с высоты 1,1 м. Коэффициент динамичности, определённый по методу Кокса, составил $k_д = 384$. Показано, что при квазистатическом нелинейном расчёте прослеживается уменьшение прогиба при увеличении армирования, а прямой динамический метод даёт большие значения прогиба и моментов по сравнению с квазистатическим [21].

Зарубежными исследователями [16] испытаны 18 железобетонных плит при статическом (0,0004 м/с), среднем (0,4 м/с) и высоком (2 м/с) скоростях нагружения, а также 6 плит при низкоскоростном ударе (5,4 м/с) с помощью падающего груза. Установлено, что несущая способность и энергопоглощение возрастают с увеличением скорости нагружения, а поперечная арматура более эффективна, чем продольная, при высоких скоростях. Во всех случаях характер разрушения определялся продавливанием независимо от скорости нагружения [16].

Выводы

1. С увеличением высоты падения груза сходимость результатов, полученных квазистатическим и прямым динамическим методами, улучшается: расхождение уменьшается с 15 % при $h = 0,5$ м до 5 % при $h = 3,0$ м.

2. Зависимость коэффициента использования сечения от высоты падения груза носит скачкообразный характер: при уменьшении высоты в 2 раза коэффициент снижается на 62 %, при увеличении в 2 раза – на 34 %.

3. Экспериментальные исследования подтверждают, что с ростом скорости нагружения несущая способность на продавливание возрастает, а деформационная способность снижается. Заметное увеличение прочности наблюдается при скоростях деформации свыше 100 $с^{-1}$.

4. Разрушение безбалочных плит при ударном воздействии происходит по типу продавливания независимо от скорости нагружения, однако при динамическом воздействии площадь поверхности продавливания уменьшается.

5. Действующие нормативные документы не содержат рекомендаций по расчёту на продавливание при динамическом нагружении, что обусловливает необходимость дальнейших экспериментальных и теоретических исследований для разработки соответствующих методик.

Литература

1. Антонов В.А. Несущая способность монолитных каркасов с безбалочными перекрытиями с учётом возможности начальных повреждений : дис. ... канд. техн. наук. – М., 2025. – 187 с.
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М. : Минстрой России, 2018. – 164 с.
3. Руководство по проектированию железобетонных конструкций с безбалочными перекрытиями. – М. : Стройиздат, 1974. – 104 с.
4. Методические указания по расчёту безбалочного перекрытия. – М. : МГСУ, 2014. – 32 с.
5. Micallef K. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading / K. Micallef, R.L. Vollum, B.A. Izzuddin // International Journal of Impact Engineering. – 2016. – Vol. 91. – P. 42–60.
6. Al-Rousan R.Z. Failure Analysis of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Two-Way Slabs Subjected to Static and Impact Load Induced by Free Falling Mass // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2023. – Vol. 20. – P. 1–22.
7. New Insights into Punching Shear under Impact Loading / D.Z. Yankelevsky [et al.] // ACI Structural Journal. – 2024. – Vol. 121. – № 1. – P. 45–58.
8. Sukhavarshny P. Punching Shear Simulation of Flat Slab Using Truss, Stirrup and Stud / P. Sukhavarshny, R. Gettu, K. Prakasan // International Research Journal of Advanced Engineering Sciences. – 2020. – Vol. 3. – № 2. – P. 86–95.
9. Молоств В.В. О сопротивлении срезу при продавливании плоских железобетонных перекрытий // Строительная наука и техника. – 2012. – № 4. – С. 7–14.
10. Трекин Н.Н. К вопросу о несущей способности железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении / Н.Н. Трекин, В.В. Крылов // Научный аспект. – 2018. – Т. 7. – № 4. – С. 771–778.
11. Трекин Н.Н. Несущая способность монолитных железобетонных плит на продавливание при статическом и динамическом нагружении / Н.Н. Трекин, В.В. Крылов // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 5. – С. 67–80.
12. Крылов В.В. Программа экспериментальных исследований несущей способности безбалочных плит на продавливание при динамическом нагружении // Вестник БГТУ. – 2020. – № 7. – С. 45–53.
13. Патент RU 2815614C1. Стенд для испытания плит железобетонного ребристого перекрытия при ударных нагрузках. – 2024.
14. Pham T.M. Behavior of two-way slabs subjected to drop-weight / T.M. Pham, H. Hao // Инженерно-строительный журнал. – 2019. – № 6(90). – С. 51–64.
15. Saatci S. Modeling of Reinforced and Fiber-Reinforced Concrete Slabs under Impact Loads / S. Saatci, F.J. Vecchio // ACI Structural Journal. – 2017. – Vol. 114. – № 6. – P. 1611–1624.
16. Experimental Study of Reinforced Concrete Slabs under Different Loading Rates / Y. Chen [et al.] // ACI Structural Journal. – 2020. – Vol. 117. – № 4. – P. 187–200.
17. Impact Analysis on Slabs – A Review // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 4. – № 5. – P. 84–92.
18. Баранова П.С. Влияние массы падающего груза на продавливание безбалочных перекрытий / П.С. Баранова, С.В. Усанов // Молодой учёный. – 2024. – № 2(502). – С. 21–24.
19. Методы расчёта плит перекрытий на продавливание с учётом усиления композитными материалами в расчётной программе SCAD // Молодой учёный. – 2026. – № 6(620). – С. 28–33.
20. Крылов В.В. Несущая способность монолитных железобетонных плит на продавливание при динамическом нагружении : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2023. – 24 с.
21. Трекин Н.Н. Проверка несущей способности монолитной железобетонной плиты на продавливание при действии динамической нагрузки / Н.Н. Трекин, В.В. Крылов // Научный аспект. – 2019. – Т. 3. – № 3. – С. 320–325.

References

1. Antonov V.A. Load-bearing capacity of monolithic frames with flat-slab floor systems, accounting for potential initial damage : dis. … for degree of Candidate of Technical Sciences. – M., 2025. – 187 p.

2. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018. – 164 p.
3. Guidelines for the design of reinforced concrete structures with flat-slab floor systems. – M. : Stroyizdat, 1974. – 104 p.
4. Methodological Guidelines for the Design of Flat-Slab Floors. – M. : MGSU, 2014. – 32 p.
5. Micallef K. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading / K. Micallef, R.L. Vollum, B.A. Izzuddin // International Journal of Impact Engineering. – 2016. – Vol. 91. – P. 42–60.
6. Al-Rousan R.Z. Failure Analysis of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Two-Way Slabs Subjected to Static and Impact Load Induced by Free Falling Mass // Latin American Journal of Solids and Structures. – 2023. – Vol. 20. – P. 1–22.
7. New Insights into Punching Shear under Impact Loading / D.Z. Yankelevsky [et al.] // ACI Structural Journal. – 2024. – Vol. 121. – № 1. – P. 45–58.
8. Sukhavarshny P. Punching Shear Simulation of Flat Slab Using Truss, Stirrup and Stud / P. Sukhavarshny, R. Gettu, K. Prakasan // International Research Journal of Advanced Engineering Sciences. – 2020. – Vol. 3. – № 2. – P. 86–95.
9. Molostv V.V. On shear resistance during the punching of flat reinforced concrete slabs // Construction Science and Engineering. – 2012. – № 4. – P. 7–14.
10. Trekin N.N. On the issue of the punching shear capacity of reinforced concrete slabs under dynamic loading / N.N. Trekin, V.V. Krylov // Scientific Aspect. – 2018. – Vol. 7. – № 4. – P. 771–778.
11. Trekin N.N. Punching shear capacity of monolithic reinforced concrete slabs under static and dynamic loading / N.N. Trekin, V.V. Krylov // Construction and Reconstruction. – 2022. – № 5. – P. 67–80.
12. Krylov V.V. Program of experimental studies on the punching shear capacity of flat slabs under dynamic loading // Bulletin of BSTU. – 2020. – № 7. – P. 45–53.
13. Patent RU 2815614C1. Test rig for reinforced concrete ribbed floor slabs subjected to impact loads. – 2024.
14. Pham T.M. Behavior of two-way slabs subjected to drop-weight / T.M. Pham, H. Hao // Инженерно-строительный журнал. – 2019. – № 6(90). – С. 51–64.
15. Saatci S. Modeling of Reinforced and Fiber-Reinforced Concrete Slabs under Impact Loads / S. Saatci, F.J. Vecchio // ACI Structural Journal. – 2017. – Vol. 114. – № 6. – P. 1611–1624.
16. Experimental Study of Reinforced Concrete Slabs under Different Loading Rates / Y. Chen [et al.] // ACI Structural Journal. – 2020. – Vol. 117. – № 4. – P. 187–200.
17. Impact Analysis on Slabs – A Review // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 4. – № 5. – P. 84–92.
18. Baranova P.S. The influence of the mass of a falling object on the punching shear of flat slabs / P.S. Baranova, S.V. Usanov // Molodoy Ucheny [Young Scientist]. – 2024. – № 2(502). – P. 21–24.
19. Methods for calculating the punching shear of floor slabs reinforced with composite materials using the SCAD software // Molodoy Ucheny [Young Scientist]. – 2026. – № 6(620). – P. 28–33.
20. Krylov V.V. Punching Shear Capacity of Monolithic Reinforced Concrete Slabs Under Dynamic Loading: Abstract of a Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. – M., 2023. – 24 p.
21. Trekin N.N. Verification of the Punching Shear Capacity of a Monolithic Reinforced Concrete Slab Under Dynamic Loading / N.N. Trekin, V.V. Krylov // Nauchnyy Aspekt [Scientific Aspect]. – 2019. – Vol. 3. – № 3. – P. 320–325.

УДК 691.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И СООРУЖЕНИЙ ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

♦♦♦♦♦

RESEARCH INTO WAYS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT SUPPLY IN THE PRODUCTION OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS AND STRUCTURES OF THE HOUSING AND UTILITIES SECTOR

Богомолов Олег Владимирович
доктор технических наук,
профессор,
академик Российской инженерной академии,
генеральный директор,
ООО Инженерная Компания «ИНТЕРБЛОК»
o.bogomolov@interblock.ru

Кузин Виктор Федорович
доктор технических наук,
профессор,
академик-секретарь Секции РИА
Российская инженерная академия (РИА)
vfkuzin@mail.ru

Малышев Александр Александрович
кандидат химических наук,
заместитель генерального директора по научной работе,
ООО Инженерная Компания «ИНТЕРБЛОК»
malyshev@interblock.ru

Аннотация. Исследованы вопросы повышения энергоэффективности технологических процессов тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий на производственных предприятиях. Обосновано применение для этих целей энергоэффективных парогенераторов ИНТЕРБЛОК российского производства, и применение их в блочно-модульных котельных для отопления и горячего водоснабжения зданий и сооружений.

Ключевые слова: парогенератор ИНТЕРБЛОК, эффективные и экологичные процессы тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий, блочно-модульная котельная, снижение расхода топлива.

Bogomolov Oleg Vladimirovich
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Academician
of the Russian Engineering Academy,
General Director,
Limited Liability Company Engineering Company «INTERBLOCK».
o.bogomolov@interblock.ru

Kuzin Viktor Fedorovich
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Academician-Secretary of the RIA Section
Russian Engineering Academy
vfkuzin@mail.ru

Malyshev Alexander Alexandrovich
Candidate of Chemical Sciences,
Deputy Director General for Research,
Limited Liability Company Engineering Company INTERBLOCK.
malyshev@interblock.ru

Annotation. The issues of improving the energy efficiency of technological processes for the heat and moisture treatment of concrete and reinforced concrete products at production facilities have been studied. The use of energy efficient steam generators INTERBLOCK of Russian manufacture for these purposes has been substantiated, as has their use in modular block type boiler houses for heating and hot water supply of buildings and structures.

Keywords: INTERBLOCK steam generator, efficient and environmentally friendly processes of heat and moisture treatment of concrete and reinforced concrete products and Block-modular boiler house, reduction of fuel consumption.

При создании новых и реконструкции действующих предприятий по производству бетонных и железобетонных изделий неизбежно возникает задача эффективного пароснабжения технологических процессов. Учитывая весьма высокую стоимость этого теплоносителя, включая его генерацию, он становится одним из основных факторов экономической эффективности производства ЖБИ. В условиях постоянного роста цен на топливо задача уменьшения затрат на производство пара приобретает особую важность для снижения себестоимости и повышения конкурентоспособности продукции.

Исследования, проведённые специалистами Инженерной компании ИНТЕРБЛОК в рамках обследования паросилового хозяйства и реализации проектов по их модернизации на нескольких десятках заводов ЖБИ в России, Белоруссии, Казахстане, Киргизии, выявили значительный перерасход тепловой энергии, что связано с эксплуатацией неэффективных паровых котлов и другого теплоэнергетического оборудование. В силу конструктивных и эксплуатационных особенностей паровые котлы не могут эффективно регулировать подачу пара в зависимости от потребностей производства, что ведёт к его перерасходу. В результате только один за-

вод ЖБИ средней производительности может бесполезно сжигать около миллиона рублей в год, выбрасывая в атмосферу большое количество вредных веществ CO, NOx, загрязняя окружающую среду. Следует заметить, что усовершенствование паропроизводящего котлового оборудования путём замены горелочных устройств, установки систем контроля герметичности, регулируемых приводов, усовершенствования автоматики и т.п., конечно, повышает КПД, но лишь на столько, на сколько позволяет конструкция самого котла. В результате потратив весьма немалые деньги, предприятие продолжает эксплуатировать устаревшие затратные теплоагрегаты.

Кратное повышение энергоэффективности производства возможно путём радикальной замены теплоисточников, за счёт создания автономных производственных теплоэнергетических комплексов на основе высокоэффективных парогенераторов отечественного производства. Парогенераторы ИНТЕРБЛОК – высокоэффективные парогенерирующие системы прямого нагрева, предназначенные для производства насыщенного пара и нагрева воды. Основное применение парогенераторы находят в технологических процессах тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий, где пар используют в качестве теплоносителя в диапазоне температур 120–160 °С при давлении пара до 0,05 МПа [1, 2, 3].

Инженерная компания ИНТЕРБЛОК разработала способ предварительной оценки энергоэффективности завода по производству железобетонных изделий [4]. Оценка эффективности сводится к приведению общезаводского потребления природного газа в $м^3$ за период, к объёму произведенной железобетонной продукции в $м^3$ за тот же период:

$$G_{эфф} = м^3 \text{ газа} / м^3 \text{ ЖБИ}. \quad (1)$$

Например, годовой объём завода 50000 $м^3$ жби, при этом общезаводское потребление природного газа за этот период составил 500 тыс. $м^3$. В этом случае расход природного газа на 1 $м^3$ ЖБИ не превышает 10 $м^3$, что указывает на вполне эффективную работу системы теплоснабжения предприятия.

Если этот показатель превышает значение 10 $м^3$ газа / $м^3$ ЖБИ, система теплоснабжения завода требует совершенствования.

Финансовые потери завода ЖБИ от неэффективной теплоэнергетики можно рассчитать по формуле:

$$П = V_{БЕТОН} \times (G_{ГАЗ\ КОТЕЛ}/м^3 - G_{ГАЗ\ ПГ}/м^3) \times C_{ГАЗ}, \quad (2)$$

где $V_{БЕТОН}$ – годовой объем выпуска жби, $м^3$/год; $G_{ГАЗ\ КОТЕЛ}$ / $м^3$ – расход природного газа на 1 $м^3$ ЖБИ при эксплуатации паровых котлов; $G_{ГАЗ\ ПГ}$ / $м^3$ – расход природного газа 1 $м^3$ на 1 $м^3$ ЖБИ при эксплуатации парогенераторов ИНТЕРБЛОК; $C_{ГАЗ}$ – стоимость 1 $м^3$ природного газа, руб./$м^3$.

Таблица 1 – Основные технические характеристики парогенераторов ИНТЕРБЛОК

Технические характеристики	Модель парогенератора ИНТЕРБЛОК			
	ST-350H	ST-102H	ST-302H	ST-502H
Тепловая мощность, кВт	100	290	870	1450
Паропроизводительность, т/ч	0,15	0,5	1,5	2,5
Диапазон рабочих температур пара, °С	100–200			
КПД, %	97–99			
Давление пара, не более, МПа	0,05			
Потребляемая эл. мощность, кВт	1,0	5,5	15	35
Расход воды, л/мин ($м^3$/час)	1,5 (0,09)	4 (0,24)	12 (0,72)	19 (1,14)
Расход природного газа, $м^3$/час	9	28	85	142
Расход СУГ (пропана), кг/час	8	23	69	115
Расход дизельного топлива, кг/час	8	23	70	117
Расход газоконденсата, кг/час	10	25	75	125
Вес установки, т	0,54	1,7	2,2	3,8
Размеры (Д × Ш × В), м	1,5 × 1,2 × 1,2	1,8 × 1,4 × 1,6	2,0 × 1,8 × 1,9	2,3 × 2,0 × 2,0

Одним из направлений повышения энергоэффективности производства бетонных и железобетонных изделий является модернизация системы теплоснабжения завода путём замены устаревших котловых технологий на инновационные промышленные парогенераторы отечественного производства. Российская технология ИНТЕРБЛОК успешно работает на более 80 заводах ЖБИ в России, Белоруссии, Казахстане, Киргизии. На большинстве предприятий коли-

чество тепла для тепловлажностной обработки 1 м^3 ЖБИ снизилось до 0,06–0,08 Гкал и не превышает 10 м^3 природного газа на 1 м^3 ЖБИ, затраты на энергоносители сократились в 3–4 раза.

Уникальный результат, достигнутый в результате модернизации паросилового хозяйства, получен на предприятии АО СЗ «Завод ЖБИ-3», г. Казань – в результате замены парового котла Е6,5/14 на промышленный парогенератор ИНТЕРБЛОК ST-502Н в технологических процессах тепловлажностной обработки ЖБИ средний удельный расход газа на ТВО сократился до уровня 6,1–6,5 м^3 природного газа на 1 м^3 выпускаемых ЖБИ. Дополнительный эффект от модернизации – сокращение численности обслуживающего персонала на 30 %, повышение комфортности условий труда.



Рисунок 1 – Парогенератор ИНТЕРБЛОК на АО СЗ «Завод ЖБИ-3», г. Казань

На предприятии ООО «ЗЖБИ-500», г. Магнитогорск, при использовании паровых котлов для тепловой обработки 1м^3 ЖБИ требовалось 62,7м^3 природного газа, после модернизации паросилового хозяйства с созданием автономной децентрализованной системы теплоснабжения на базе парогенераторов ИНТЕРБЛОК ST-502 потребление природного газа на производство 1 м^3 ЖБИ сократилось в 3 раза (график на рис. 2).

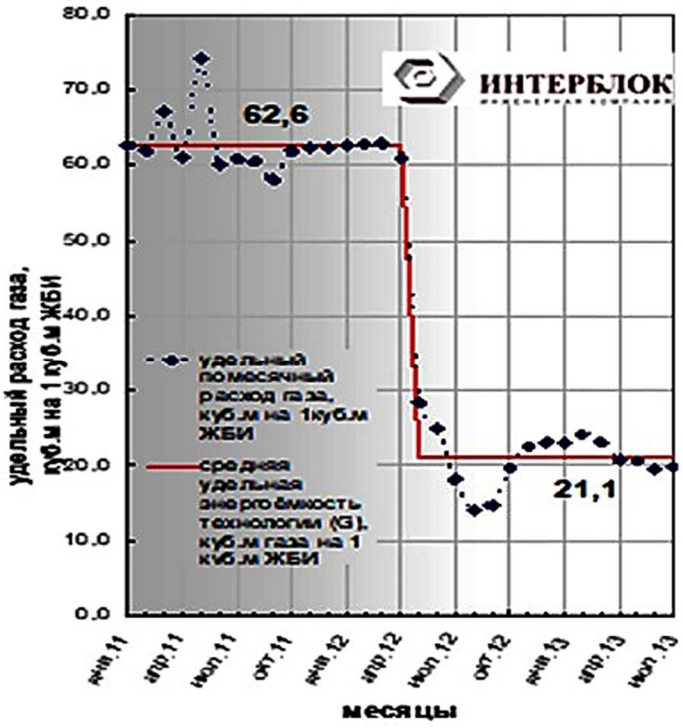


Рисунок 2 – Удельный расход природного газа после замены паровых котлов на парогенераторы ИНТЕРБЛОК

Наибольшую экологическую опасность для здоровья человека и окружающей среды представляют вредные выбросы дымовых газов от отопительно-производственных котельных. Снизить вредное влияние на здоровье человека от вредных выбросов призваны блочно-модульные котельные ИНТЕРБЛОК без дымовой трубы и высоким КПД. Особенно востребованы эти технологии в морской и горной санаторно-курортных зонах страны, где очень внимательно следят за чистотой воздуха и воды, а также в районах с высоким уровнем выбросов вредных веществ в атмосферу для улучшения экологической обстановки. Основой для создания инновационных водогрейных отопительных блочно-модульных котельных с КПД 97 % для жилищно-коммунального комплекса (рис. 3) являются энергоэффективные парогенераторы ИНТЕРБЛОК [5].



Рисунок 3 – Отопительная водогрейная котельная ИНТЕРБЛОК без дымовой трубы в Московской обл.

Основными преимуществами котельных являются:
- отсутствие дымовой трубы;
- автоматическая погодозависимая система регулирования мощности теплоагрегатов
- в зависимости от температуры наружного воздуха;
- каскадное включение (отключение) теплоагрегатов в зависимости от температуры
- наружного воздуха;
- дистанционный контроль и управление работой котельной.

Результаты исследований и опыт внедрения подтверждают, что реальную энергоэффективность производства ЖБИ и жилищно-коммунального комплекса можно повысить в несколько раз путём создания автономных производственных теплоэнергетических комплексов на основе высокоэффективных парогенераторов ИНТЕРБЛОК.

Применение теплоагрегатов ИНТЕРБЛОК в технологиях производства бетонных и железобетонных изделий, отоплении и горячем водоснабжении зданий и сооружений, обеспечивает снижение стоимости 1 Гкал тепла в 2–3 раза и исключает выбросы вредных веществ в атмосферу по сравнению с известными котловыми технологиями.

Литература

1. Патент 181138. Парогенератор / О.В. Богомолов [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «ИнтерБлок-Техно». №2017126052/06; заявл. 20.07.2017, опубл. 2018.07.05, Бюл. № 19.
2. Патент 2598667. Способ получения теплоносителя для тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий / О.В. Богомолов [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «ИнтерБлок-Техно». №2015136195/03; заявл. 2015.06.10, опубл. 2016.07.20, Бюл. № 27.
3. Патент 2591217. Способ тепловлажностной обработки бетонных изделий / О.В.Богомолов, А.А. Малышев; заявитель и патентообладатель ООО «ИнтерБлок-Техно». № 2015122072/03; заявл. 2015.08.27.10, опубл. 2016.09.27. Бюл. № 20.
4. Богомолов О.В. Как оценить эффективность производства ЖБИ // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2017. – № 11–12. – 21 с.

5. Богомолов О.В. Промышленные парогенераторы ИНТЕРБЛОК и инновационные технологии на их основе / О.В. Богомолов, В.Ф. Кузин, А.А. Малышев // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2024. – Т.10. – № 4. – С. 91–102.

References

1. Patent 181138. Steam generator / O.V. Bogomolov [et al.]; applicant and patent holder InterBlock-Techno LLC. № 2017126052/06; declared 20.07.2017, published 2018.07.05, Bulletin No. 19.
2. Patent 2598667. Method for producing a heat transfer fluid for heat and moisture treatment of concrete and reinforced concrete products / O.V. Bogomolov [et al.]; applicant and patent holder InterBlock-Techno LLC. № 2015136195/03; declared 2015.06.10, published 2016.07.20, Bulletin № 27.
3. Patent 2591217. Method for heat and moisture treatment of concrete products / O.V. Bogomolov, A.A. Malyshev; applicant and patent holder InterBlock-Techno LLC. № 2015122072/03; declared 2015.08.27.10, published 2016.09.27. Bulletin № 20.
4. Bogomolov O.V. How to evaluate the efficiency of reinforced concrete production // Construction materials, equipment, technologies of the 21st century. – 2017. – № 11–12. – 21 p.
5. Bogomolov O.V. Industrial steam generators INTERBLOCK and innovative technologies based on them / O.V. Bogomolov, V.F. Kuzin, A.A. Malyshev // Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia. – 2024. – Vol. 10. – № 4. – P. 91–102.

УДК 711.581-168

ВЛИЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА СТАНОВЛЕНИЕ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНОГО ОБЛИКА КРАСНОДАРА В СОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

♦♦♦♦♦

THE INFLUENCE OF INDUSTRIAL ENTERPRISES ON THE FORMATION OF THE ARCHITECTURAL AND PLANNING APPEARANCE OF KRASNODAR DURING THE SOVIET PERIOD

Брагин Виктор Иванович
почетный член Правления
Краснодарского регионального отделения
Союза архитекторов России,
старший преподаватель кафедры архитектуры
гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет

Дубиненко Никита Александрович
лаборант кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
nikita-dubinenko@yandex.com

Карнаушенко Алина Алексеевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
karnaushenkoalina@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрена проблема влияния промышленных предприятий на становление архитектурно-планировочного облика Краснодара в советский период. По результатам анализа статистических данных за исследуемый период сделаны выводы о роли промышленности в развитии городской инфраструктуры, транспорта, жилищного хозяйства, архитектуры и благоустройства. Установлено, что предприятия, функционировавшие в Краснодаре в советский период, не имели градообразующего значения, вследствие чего действовали строгие ограничения в вопросе строительства архитектурных доминант, а также пропускной способности общегородских магистралей и мостов. Данные ограничительные факторы с течением времени стали большими проблемами для города, существенно увеличившегося по размерам и населению.

Ключевые слова: градостроительство, промышленные зоны, производственные объекты, городская инфраструктура, архитектурно-планировочный облик, магистрали общегородского значения.

Bragin Viktor Ivanovich
Honorary Member of the Board
of the Krasnodar Regional branch
of the Union of Architects of Russia,
Senior Lecturer at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University

Dubinenko Nikita Aleksandrovich
Laboratory Assistant at the Department
of Architecture of Civil
and Industrial Buildings
named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
nikita-dubinenko@yandex.com

Karnaushenko Alina Alekseevna
Student,
Kuban State Technological University
karnaushenkoalina@yandex.ru

Annotation. The article examines the problem of the influence of industrial enterprises on the formation of the architectural and planning appearance of Krasnodar during the Soviet period. Based on the analysis of statistical data for the studied period, conclusions are drawn about the role of industry in the development of urban infrastructure, transport, housing, architecture, and landscaping. It has been established that the enterprises operating in Krasnodar during the Soviet period did not have a city forming significance, which led to strict restrictions on the construction of architectural landmarks, as well as on the capacity of city wide highways and bridges. These restrictive factors have over time become major problems for the city, which has significantly grown in size and population.

Keywords: urban planning, industrial zones, production facilities, urban infrastructure, architectural and planning appearance, city wide highways.

В советский период, когда господствовала индустриальная экономика, статус населенного пункта во многом зависел от нахождения в нем промышленных производств [1]. Чем больше было производств, тем больше было население и больше средств отчислялось в местный бюджет, что давало городам весьма значительные перспективы для развития. Также многое зависело от отрасли промышленности: большей значимостью обладали предприятия тяжелой промышленности, нефтехимии, электроэнергетики, меньшей – легкой промышленности, деревообработки, пищевого и сельскохозяйственного производства.

Для крупного города было важно обладать серьезной промышленной базой с предприятиями союзного подчинения, протяженными цехами на несколько десятков тысяч рабочих. В

подобных случаях из центра выделялись дополнительные финансы на развитие образования, культуры, транспорта, медицины, гражданского строительства и благоустройства. Для градостроительства советского периода распространенным явлением стали предприятия, имеющие градообразующее значение. А в ряде примеров создание крупного производственного комплекса сопровождалось строительством нового города [2].

Все крупнейшие города времен СССР так или иначе были крупными промышленными центрами с предприятиями тяжелой промышленности. Значимые производства в таких городах оказывали непосредственное влияние на архитектуру и градостроительство, т.к. при заводах зачастую строились жилые микрорайоны, больницы, дома культуры, планировались уличнодорожная и транспортная сети, способные обеспечить доступ на работу для тысяч человек.

В условиях г. Краснодара вопрос влияния предприятий на становление архитектурного облика остается весьма актуальным. В настоящий момент представлено множество исследований, так или иначе затрагивающих эту тему [3–6]. При этом не в полной мере выявлена роль промышленности в развитии городской инфраструктуры, транспорта, жилищного хозяйства, архитектуры и благоустройства.

Полномасштабное развитие промышленности в г. Краснодаре началось после утверждения советской власти на Кубани в 1920-х гг. До этого момента, еще в г. Екатеринодаре, промышленность не развивалась такими темпами, город был скорее торгово-купеческим, о чем в настоящий момент свидетельствует большое количество особняков в старом центре (но также важно заметить, что в начале XX века на пустующих землях в пригороде стали появляться первые заводы, а вместе с ними и рабочие окраины, жители которых стали основой пролетарского движения в период революций) [7].

В эпоху первой и второй пятилеток в городе открываются предприятия машиностроения, приборостроения и пищевой промышленности [8, 9]. Ряд заводов подвергается масштабной реконструкции в 1920-х – 1940-х гг. (табл. 1). При этом, важно заметить, что г. Краснодар в период с 1924 г по 1937 г утратил статус региональной столицы. Вместо этого город стал окружным центром в составе Северо-Кавказского края, обладавшего вертикально-интегрированной административно-территориальной структурой, центральная власть в которой принадлежала г. Ростову-на-Дону. Таким образом, преобразования явно показали снижение роли г. Краснодара (статус города – центра крупного региона понизили до города – центра муниципалитета) и повлекли за собой значительное отставание в развитии промышленности, архитектуры и благоустройства.

Таблица 1 – Предприятия г. Краснодара, открытые в период 1920-х – 1930-х гг.

№	Предприятие	Год запуска	Специализация
1	2	3	4
1920-е гг.			
1	Завод «Октябрь»	1927	Чугунно-литейное производство, выпуск колесных тракторов и запчастей к ним
2	Завод «Техжирпром»	1929	Входил в подчинение управления клееварочной и мыловаренной промышленности
1930-е гг.			
3	Шорно-седельная фабрика им. РККА	1930	Производство изделий и снаряжения из кожи
4	Мясокомбинат	1930	Производство колбасных изделий, сосисок, сарделек, мясных консервов
5	Краснодарская районная электростанция (РЭС)	1931	Производство электрической энергии
6	Краснодарский ремонтный завод	1933	Капительный ремонт тракторов и изготовление запчастей
7	Завод измерительных приборов (ЗИП)	1939	Производство контрольно-измерительных приборов, информационно-вычислительных комплексов и систем телемеханики
8	Витаминный комбинат	1939	Производство витаминных препаратов, медицинских и биохимических веществ для медицины и сельского хозяйства
Реконструкция			
9	Завод «Краснолит» (бывший завод К.Л. Гусника)	1886 / 1922	Литейное производство (в том числе производство весов столовых и товарных)
10	Масложиркомбинат (МЖК) им. В.В. Куйбышева (бывший маслобойный завод Аведова)	1899 /1932	Производство масложировой продукции: подсолнечное масло, маргарин, майонез, мыло, глицерин

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
11	Завод им. М.И. Калинина (бывший обозостроительный завод)	1900 /1932	Производство сложных металлорежущих станков и автоматических линий
12	Нефтеперерабатывающий завод	1911 / 1934	Переработка нефти
13	Завод им. Г.М. Седина (бывший завод Кубаноль)	1911 / 1937	Производство тяжелых и уникальных станков

После окончания нацистской оккупации г. Краснодара, для нужд наступающей Красной армии открывается ряд стратегических предприятий (впоследствии они были переориентированы на производство товаров народного потребления). В послевоенный период в городе происходит масштабное восстановление промышленной базы, разрушенной за годы оккупации: первыми восстанавливаются ключевые предприятия, за ними – машиностроительные заводы, способные работать в сфере оборонного профиля, и только затем – все остальные [5]. К концу 1950-х удается полностью восстановить довоенные мощности промышленности, а также запустить новые предприятия [10]. Наиболее крупные из них приведены в таблице (табл. 2).

Таблица 2 – Предприятия г. Краснодара, открытые в период 1940-х – 1950-х гг.

№	Предприятие	Год запуска	Специализация
1940-е гг.			
1	Краснодарский табачный комбинат	1943	Производство табачной продукции
2	Парфюмерно-косметическая фабрика	1943	Производство парфюмерно-косметической продукции
3	Завод Нефтемаш	1949	Производство оборудования для нефтедобычи
1950-е гг.			
4	Камвольно-суконный комбинат (КСК)	1951	Производство шерстяных тканей камвольной и суконной группы
5	Компрессорный завод	1952	Производство поршневых компрессоров и холодильного оборудования
6	Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ)	1954	Производство электрической и тепловой энергии для нужд города и края
7	Краснодарский гидролизный завод	1957	Производство этилового спирта, дрожжей, сухого льда и пр.
8	Завод резиновых технических изделий	1959	Производство резиновых технических изделий

В период 1960-х гг. город превращается в ведущий центр легкой промышленности на Северном Кавказе: в 1960 г открывается фарфорофаянсовый завод «Чайка», в 1961 г – крупный Краснодарский хлопчатобумажный комбинат и пр. В соответствии с общесоюзными тенденциями в г. Краснодаре постепенно развиваются предприятия строительной отрасли, обеспечивающие массовое возведение гражданских зданий (в том числе с учетом объемно-блочного домостроения) [11]. Также на рубеже 1960-х – 1970-х гг. продолжает развиваться приборостроение (табл. 3).

Таблица 3 – Предприятия г. Краснодара, открытые в период 1960-х – 1970-х гг.

№	Предприятие	Год запуска	Специализация
1	2	3	4
1960-е гг.			
1	Фарфорофаянсовый завод «Чайка»	1960	Производство фарфоровой и фаянсовой посуды и предметов интерьера
2	Домостроительный комбинат	1960	Производство сборных железобетонных конструкций
3	Фабрика картонажных изделий	1960	Картонажное и переплетное производство
4	Хлопчатобумажный комбинат (ХБК)	1961	Производство хлопчатобумажных тканей, включая ворсовые и меланжевые ткани
5	Рубероидный завод	1962	Производство рубероида и других кровельных материалов

Окончание таблицы 3

1	2	3	4
6	Мебельное объеди-нение «Кубань»	1964	Производство мебели
7	Завод радиоизмерительных приборов	1967	Производство радиоизмерительных приборов и сложной электронной техники
1970-е гг.			
8	Завод объемно-блочного домостроения	1974	Выпуск блок-комнат для жилых многоэтажных домов

Таким образом, по результатам анализа вышепредставленных данных в зависимости от исторического этапа прослеживаются характерные тенденции в сфере влияния промышленности на архитектуру и градостроительство г. Краснодара. Так, в период 1920-х гг. предприятия строились рядом с существующей застройкой и железными дорогами, неподалеку от наиболее крупных из них появлялись жилые кварталы для рабочих (в большинстве случаев застройка в них была представлена индивидуальными малоэтажными домами).

В 1930-х гг. на окраине г. Краснодара появляется мясокомбинат, благодаря чему начинают активно развиваться восточные районы. Там же постепенно зарождается протяженная промышленная зона на пойменных территориях реки Кубань и возле Старой Кубани, строится ответвление от магистральной железнодорожной линии с целью транспортировки грузов.

В послевоенные годы все активнее реализуется практика строительства жилых районов при крупных производствах: застраивается микрорайон при заводе им. Г.М. Седина; на ул. им. Шевченко формируется парадный въезд с ул. им. Карла Либкнехта (современная ул. Ставропольская) до предприятий, состоящий из пяти зданий, фасады которых выполнены в стиле сталинской архитектуры послевоенного периода; по южному краю Первомайской рощи (современная Чистяковская роща) застраивается жилой район при заводе ЗИП, в том числе с организацией здесь крупного больничного комплекса.

В 1950-х гг. по окраинам г. Краснодара появляются рабочие поселки со всей необходимой инфраструктурой:

1-й – при камвольно-суконном комбинате в восточной части города (со строительством дома культуры и др. инфраструктуры);

2-й – при заводе Нефтемаш в северной части города (так называемый «городок нефтяников») [10].

Для работников Краснодарской теплоэлектроцентрали на территории Пашковского поселка (в тот момент относившегося к Краснодарскому горисполкому) строятся жилые кварталы со всей сопутствующей инфраструктурой. Отдельного внимания заслуживает дом культуры ТЭЦ, вокруг которого формировался весь ансамбль жилого района.

Во второй половине 1950-х гг. начинается эпоха массового жилищного строительства. На свободных территориях появляются микрорайоны, застроенные пятиэтажными панельными жилыми зданиями типовых серий. Из-за активного роста города предприятия разной степени вредности оказываются не просто в границах городской черты, а в непосредственной близости от центра (завод «Октябрь», завод им. М.И. Калинина и др.).

Постепенно в г. Краснодаре открывается все больше организаций среднего и начального профессионального образования. Некоторые из них строятся на базе действующих производств, другие – при профильных ведомствах. К таким учебным заведениям относятся: монтажный техникум, сахарный техникум, пашковский сельскохозяйственный техникум, архитектурно-строительный техникум, электротехнический техникум, машиностроительный техникум и пр. В качестве сопутствующих объектов, помимо трех-, четырехэтажных учебных корпусов, возводились вспомогательные здания, общежития, столовые и мастерские.

В 1960-х строится жилье при фарфорофаянсовом заводе «Чайка», рубероидном заводе, заводе радиоизмерительных приборов. Для перечисленных предприятий формируются жилые кварталы и микрорайоны, население которых составляло до 5–7 тыс. чел.

На этом фоне образцовым становится микрорайон при Краснодарском хлопчатобумажном комбинате, где возводятся многоэтажные (9 этажей) и среднеэтажные (5 этажей) жилые дома и общежития, развивается инфраструктура: почтовое отделение, поликлиника, образовательные учреждения и т.п. [12]. Вдоль ул. Стасова формируется ансамбль административно-бытовых зданий комбината. В районе улиц им. Карла Либкнехта и им. Айвазовского создается многопрофильная больница ХБК, в тот момент один из крупнейших объектов здравоохранения в Краснодарском крае. Вплоть до конца 1970-х гг. ведется строительство большого дома культуры ХБК по типовому проекту [12].

Влияние крупнейших предприятий на архитектурно-планировочный облик г. Краснодара в советский период представлено в графическом (рис. 1) и табличном (табл. 4) виде.



Рисунок 1 – Карта промышленных объектов в структуре застройки г. Краснодара на момент 1980-х гг.

Таблица 4 – Строительство значимых инфраструктурных объектов при промышленных предприятиях г. Краснодара

№	Предприятия				
	Хлопчатобумажный комбинат (ХБК)	Камвольно-суконный комбинат (КСК)	Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ)	Завод измерит. приборов (ЗИП)	Завод им. Седина
1	Здравоохранение				
	Больница ХБК (больн. № 3), поликлиника	Поликлиника	Поликлиника	Больница ЗИП (краевая больн. скорой помощи)	Медико-санитарная часть (МСЧ)
2	Культура				
	Дом культуры ХБК (Театр современного искусства)	Дом культуры КСК (Молодежный центр)	Дом культуры ТЭЦ (образоват. учреждение СПО)	Дом культуры ЗИП (Екатерининский зал)	–
3	Благоустройство				
	Сквер по ул. им. Селезнева (сквер им. Л.Г. Гатова)	Сквер по ул. Сормовской (Молодежный сквер)	Сквер у дома культуры ТЭЦ (Студенческий сквер)	Благоустройство участка Первомайской рощи в районе дома культуры ЗИП	Сквер им. Г.М. Седина
4	Образование				
	ПТУ № 24 (ГБПОУ УУ «КТЭК»), дошкольные и общеобразоват. учреждения	Дошкольные и общеобразоват. учреждения	Дошкольные и общеобразоват. учреждения	Электротехнич. техникум (ГБПОУ КК «ККЭП»), дошкольные и общеобразоват. учреждения	Машиностр. техникум (ГБПОУ КК «КМСК»), дошкольные и общеобразоват учреждения

Можно сделать вывод, что промышленные предприятия в советский период оказывали следующее влияние на архитектурно-планировочный облик г. Краснодара:

1. В структуре городской застройки появлялись протяженные промышленные территории, включающие в себя производственные и административно-бытовые объекты. Появлению предприятий зачастую сопутствовало формирование санитарно-защитных зон с зелеными насаждениями и коммунально-складских зон, которые к периоду 1980-х гг. станут занимать обширные территории (особенно в восточной части города).

2. В силу того, что краснодарские предприятия были сравнительно небольшими (численный состав их сотрудников не превышал 15 тыс. чел.), они не имели градообразующего значения и не становились основой для возникновения обширных жилых массивов. Действовали ограничения на строительство архитектурных доминант или иных зданий с выдающимся художественным оформлением фасадов, а также общегородских магистралей со статусом проспекта (ограничения касались даже количества полос для движения автомобилей и ширины мостов).

3. Ряд промышленных предприятий оказался непосредственно в центральной части г. Краснодара, что негативно сказалось на экологии приземного слоя атмосферной среды многих жилых районов, а также на архитектуре: застройка центра нередко стилистически конфликтовала с корпусами промышленных цехов и складскими объектами.

4. На планировочную структуру застройки г. Краснодара повлияли рабочие поселки, изначально строившиеся по окраинам, но уже ко второй половине 1970-х – первой половине 1980-х полноценно интегрировавшиеся в состав города. В некоторых случаях стал возникать конфликт между несообразной застройкой: например, малоэтажные жилые здания «городка нефтяников» не сочетались с презентационным обликом архитектурного ансамбля по ул. Красной, главной магистрали города.

В итоге проблемы, вызванные влиянием предприятий на архитектурно-планировочный облик г. Краснодара в советский период, обострились с течением времени: после 1990-х гг. в центральной части города, а также в других местах стали закрываться промышленные объекты, появились огромные неиспользуемые территории, для которых необходимо продумывать мероприятия по реновации или реставрации с целью адаптации к современным реалиям. Также негативные последствия вызвали действовавшие ограничения на формирование проспектов с большой пропускной способностью, что через 40–50 лет спровоцировало появление заторов на всех ключевых магистралях общегородского значения в эпоху массовой автомобилизации.

Литература

1. Лаврентьева М.А. История становления современного архитектурно-планировочного облика города Тимашевска / М.А. Лаврентьева, Н.А. Дубиненко // Вектор гуманитарной мысли. – 2025. – № 2. – С. 43–59.
2. Мылова Ю.А. Эволюция планировочной структуры советского промышленного города (на примере г. Комсомольска-на-Амуре) // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2016. – № 1(28). – С. 16–21.
3. Шнурникова Е.П. Методы интеграции промышленных зданий в историческую городскую среду на примере г. Краснодара / Е.П. Шнурникова, Ю.Н. Половинкина, Р.О. Кузьмин // Урбанистика. – 2026. – № 2. – С. 35–50.
4. Лаврентьева М.А. Функционирование Краснодарского хлопчатобумажного комбината в период конца 1970-х – первой половины 1980-х годов и его влияние на формирование городской инфраструктуры / М.А. Лаврентьева, Н.А. Дубиненко // Исторический бюллетень. – 2025. – Т. 8. – № 8. – С. 70–75.
5. От разрушений к восстановлению: как в Краснодаре возрождали предприятия после Великой Отечественной войны. – URL : https://www.dg-yug.ru/article/20179847.html (дата обращения 03.09.2026).
6. Шнурникова Е.П. Особенности застройки исторического центра г. Краснодар в период с 1943 по 1955г / Е.П. Шнурникова, Ю.А. Иванникова, А.И. Джахуа // Цифровое общество: научные инициативы и новые вызовы: Сборник научных трудов по материалам XIX Международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2025 года. – М. : АНО ДПО «Университет ИТБО», 2025. – С. 122–129.
7. Шнурникова Е.П. Характерные черты модерна в особняках и общественных зданиях Екатеринодара / Е.П. Шнурникова, Ю.А. Иванникова, А.И. Джахуа // Цифровое общество: научные инициативы и новые вызовы: Сборник научных трудов по материалам XIX Международной научно-практической конференции, Москва, 15 декабря 2025 года. – М. : АНО ДПО «Университет ИТБО», 2025. – С. 113–121.
8. Открытое акционерное общество «Зеркально-фурнитурный комбинат». Фонд № Р-666 / Неархив. Путеводитель по фондам архивов. – URL : https://notarc.org/ru/232692 (дата обращения 06.09.2026).

9. Краснодарский комбинат биохимических и витаминных препаратов имени Карла Маркса Всесоюзного производственного объединения «Союзвитамины» Министерства медицинской промышленности СССР, г. Краснодар Краснодарского края, 1939 г. Фонд № Р-1421 / Неархив. Путеводитель по фондам архивов. – URL : https://notarc.org/ru/424274 (дата обращения 06.09.2026).
10. Сокольская О.Н. Послевоенное восстановление Краснодара / О.Н. Сокольская, Н.А. Дубиненко // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2024. – № 2(35). – С. 11 – 15.
11. Постановление Центрального Комитета КПСС и Совета Министров СССР от 31 июля 1957 г. № 931 «О развитии жилищного строительства в СССР». Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL : https://docs.cntd.ru/document/765714291 (дата обращения 04.09.2026).
12. Деятельность Краснодарского хлопчатобумажного комбината в период 60-х – 70-х годов XX века и его вклад в развитие инфраструктуры города Краснодара / М.А. Лаврентьева [и др.] // Исторический бюллетень. – 2025. – Т. 8. – № 6. – С. 202–210.

References

1. Lavrentyeva M.A. The History of the Formation of the Modern Architectural and Planning Appearance of the City of Timashevsk / M.A. Lavrentyeva, N.A. Dubinenko // Vector of Humanitarian Thought. – 2025. – № 2. – P. 43–59.
2. Mylova Yu.A. Evolution of the planning structure of the Soviet industrial city (on the example of Komsomolsk-on-Amur) // Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. – 2016. – № 1(28). – P. 16–21.
3. Shnurnikova E.P. Methods of integrating industrial buildings into the historical urban environment using the example of Krasnodar / E.P. Shnurnikova, Yu.N. Polovinkina, R.O. Kuzmin // Urbanistics. – 2026. – № 2. – P. 35–50.
4. Lavrentyeva M.A. The operation of the Krasnodar Cotton Mill in the late 1970s – first half of the 1980s and its impact on the formation of urban infrastructure / M.A. Lavrentyeva, N.A. Dubinenko // Historical Bulletin. – 2025. – Vol. 8. – № 8. – P. 70–75.
5. From destruction to recovery: how enterprises were revived in Krasnodar after the Great Patriotic War. – URL : https://www.dg-yug.ru/article/20179847.html (date of application 09.03.2026).
6. Shnurnikova E.P. Features of the construction of the historical center of Krasnodar in the period from 1943 to 1955 / E P. Shnurnikova, Yu.A. Ivannikova, A.I. Dzhakhua // Digital society: scientific initiatives and new challenges: A collection of scientific papers based on the materials of the XIX International Scientific and Practical Conference Conference, Moscow, December 15, 2025. – M. : ANO DPO «ITBO University», 2025. – P. 122–129.
7. Shnurnikova E.P. Characteristic features of Art Nouveau in the mansions and public buildings of Yekaterinodar / E.P. Shnurnikova, Yu.A. Ivannikova, A.I. Dzhakhua // Digital Society: Scientific Initiatives and New Challenges: Collection of Scientific Papers based on the materials of the 19th International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 15, 2025. – M. : ANO DPO «ITBO University», 2025. – P. 113–121.
8. Open Joint Stock Company «Mirrors and Furniture Plant». Fund № R 666 / Non Archive. Guide to Archival Collections. – URL : https://notarc.org/ru/232692 (date of application 06.09.2026).
9. Krasnodar Combine of Biochemical and Vitamin Preparations named after Karl Marx of the All Union Production Association «Soyuzvitamins» of the Ministry of Medical Industry of the USSR, Krasnodar, Krasnodar Krai, 1939. Fund № R 1421 / Nearchiv. Guide to Archival Collections. – URL : https://notarc.org/ru/424274 (date of application 06.09.2026).
10. Sokolskaya O.N., Dubinenko N.A. Post war reconstruction of Krasnodar // Urban Planning. Infrastructure. Communications. – 2024. – № 2(35). – P. 11–15.
11. Resolution No. 931 of the Central Committee of the CPSU and the Council of Ministers of the USSR dated July 31, 1957, «On the Development of Housing Construction in the USSR». Electronic Fund of Legal and Regulatory and Technical Documents. – URL : https://docs.cntd.ru/document/765714291 (date of application 04.09.2026).
12. The activities of the Krasnodar Cotton Mill in the 1960s – 1970s and its contribution to the development of the infrastructure of the city of Krasnodar / M.A. Lavrentyeva [et al.] // Historical Bulletin. – 2025. – Vol. 8. – № 6. – P. 202–210.

УДК 711.581-168

ТЕРРИТОРИИ В ПОЙМЕННОЙ ЗОНЕ СТАРОЙ КУБАНИ: ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА

♦♦♦♦♦

TERRITORIES IN THE FLOODPLAIN ZONE OF THE OLD KUBAN: PROSPECTS FOR URBAN DEVELOPMENT

Брагин Виктор Иванович
почетный член Правления
Краснодарского регионального отделения
Союза архитекторов России,
старший преподаватель кафедры архитектуры
гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет

Дубиненко Никита Александрович
лаборант кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
nikita-dubinenko@yandex.com

Аннотация. Статья посвящена проблеме градостроительного развития пойменной зоны Старой Кубани в г. Краснодаре с учетом использования ее рекреационного и биоклиматического потенциала. Рассмотрено развитие данной территории в контексте исторического процесса, а также ее современное состояние. По результатам исследования составлены рекомендации градостроительного характера по формированию новой застройки в данном районе. Предложения коснулись формирования планировочной структуры застройки, функционального зонирования территорий, организации улично-дорожной сети и общественного транспорта. Установлено, что в градостроительстве фактор биоклимата Старой Кубани для пойменной зоны должен рассматриваться как ведущий. При формировании застройки необходимо учитывать близость водного объекта, располагать здания и ориентировать улицы с учетом преобладающего направления ветровых потоков.

Ключевые слова: градостроительство, пойменные территории, рекреационное значение, биоклиматические характеристики, градостроительное зонирование, территориальное планирование.

Bragin Viktor Ivanovich
Honorary Member of the Board
of the Krasnodar Regional branch
of the Union of Architects of Russia,
Senior Lecturer at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named after A.V. Titov,
Kuban State Technological University

Dubinenko Nikita Aleksandrovich
laboratory assistant at the Department
of Architecture of Civil
and Industrial Buildings
named after A.V. Titov,
Kuban State Technological University
nikita-dubinenko@yandex.com

Annotation. The article is devoted to the problem of urban development of the floodplain zone of the Old Kuban in Krasnodar, taking into account the use of its recreational and bioclimatic potential. The development of this territory is examined in the context of the historical process, as well as its current state. Based on the research results, urban planning recommendations have been developed for the formation of new development in this area. The proposals concern the formation of the planning structure of the development, the functional zoning of territories, the organization of the road network and public transport. It has been established that in urban planning, the bioclimatic factor of the Old Kuban for the floodplain zone should be considered as the leading one. When planning development, it is necessary to take into account the proximity of a water body, to position buildings and orient streets taking into account the prevailing direction of wind flows.

Keywords: urban planning, floodplain areas, recreational value, bioclimatic characteristics, urban zoning, territorial planning.

Введение. В г. Краснодаре многие территории, расположенные вблизи водоемов, застроены хаотично, без учета современных тенденций в градостроительстве, а также требований и регламентов [1]. Зачастую богатый рекреационный потенциал и благоприятные биоклиматические характеристики таких территорий задействуются не в полной мере.

В условиях крупных городов, расположенных в южных широтах, с населением 250 тыс. чел. и более проблема развития земель вблизи водоемов и речных пойм является актуальной. Это подтверждается существующими исследованиями, достаточно широко освещающими тему освоения прибрежных территорий [2–5]. В частности, в современной научной литературе большое внимание уделяется изучению параметров биоклимата территорий речных пойм для целей градостроительства [6].

Многие исследования в сфере градостроительной климатологии на примере г. Краснодара показывают, что близость водных объектов влияет на снижение температуры деятельной поверхности застройки в среднем на 4 ℃ … 6 ℃ в сравнении с фоновыми показателями [7]. На примере других населенных пунктов III и IV строительно-климатических районов доказано, что

реки в границах городской застройки формируют местные ветровые потоки по направлению течения, что также влияет на расщепление дневного «острова тепла» [8]. Особое значение эти свойства приобретают в условиях максимального термического нагрева застройки в летний период, когда температура воздуха в г. Краснодаре достигает +35 ℃ и выше (а в некоторых очагах термического нагрева повышенной интенсивности +60 ℃ … +65 ℃) [9]. В таких условиях прибрежные и пойменные территории, благодаря их положительным биоклиматическим свойствам, становятся настоящим спасением для горожан.

При детальном рассмотрении восточной части г. Краснодара можно заметить многие водоемы, рекреационный фактор которых можно задействовать в градостроительстве. Самым крупным из них является Старая Кубань, пойменные территории которой могут стать перспективным направлением для организации городской застройки с учетом концепции комплексного развития территорий.

Территориальные рамки исследования. В данной статье рассмотрены пойменные территории с точки зрения их градостроительного потенциала в следующих границах: на западе – от урочища Красный Кут рядом с рекой Кубань вдоль улиц 3-й Кузнечный Зарой и Старокубанской; на севере – вдоль улиц Ставропольской и Трамвайной; на востоке – вдоль улицы Автолюбителей до русла реки Кубань; южная граница – само русло реки Кубань.

Анализ территории. Градостроительный анализ пойменных территорий следует начать с их изучения в контексте исторического процесса:

Во времена г. Екатеринодара пойменные территории практически не осваивались из-за их заболоченности и обилия растительности, а также вследствие особенностей военного времени, до 1867 года город имел закрытый статус, за рекой Кубань долгое время заканчивалась государственная граница [10]. Впоследствии город все время «отворачивался» от пойм реки Кубань из-за периодических затоплений в период паводков. В начале XX века в восточной части г. Екатеринодара постепенно появлялись сады вдоль Ставропольского шляха (современной ул. Ставропольской), которые постепенно подступали к Старой Кубани. После 1920-го г, уже в г. Краснодаре, появились проекты превращения территорий в пойменной зоне в пригородное дачное место [11]. В советский период город продолжил «отворачиваться» от данной территории, располагая там промышленные объекты разной степени вредности (мясокомбинат и птицекомбинат), что объяснялось паводками на реке Кубань, продолжавшимися вплоть до создания Краснодарского водохранилища в 1975 году.

Функциональный состав территории можно описать следующим образом (рис. 1): зона существующей застройки разной этажности и плотности (встречается многоэтажная и индивидуальна жилая застройка, а также гаражи для личного автотранспорта), расположенная с севера и востока относительно русла Старой Кубани; зона озеленения (парк Солнечный остров, парк Старая Кубань, урочище Красный Кут, особо охраняемые территории Большой остров и Киргизские плавни); зона перспективной застройки на юго-западе.



Рисунок 1 – Функциональный состав территорий в районе поймы Старой Кубани

С учетом всего вышеописанного необходимо в вопросе пойменных территорий Старой Кубани вести градостроительную политику с учетом благоприятных биоклиматических факторов данного водоема. Для целей градостроительства можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Формирование планировочной структуры застройки. Застройку для пойменных территорий следует проводить в рамках общей концепции разворота города «лицом» к реке, что позволит снизить последствия от многолетней политики размещения здесь хаотичной индивидуальной застройки, производственных зон и гаражей для личного автотранспорта. Вдоль береговой линии необходимо обустраивать набережные, обеспечивающие движение как пешеходов, так и автотранспорта (планировочная структура набережных, бульваров и парковых зон должна быть взаимосвязана). При проектировании зданий следует отдавать предпочтение открытой и обтекаемой формам застройки, вследствие чего закрытая застройка, колодцеобразные дворы и протяженные в плане здания должны быть или исключены, или сведены к минимуму [6]. Новое строительство в радиусе 50–200 м от берега должно вестись в соответствии с направлением ветра или располагаться под углом не более 30°, чтобы максимизировать эффекты вентиляции и движения воздуха [12]. Также для территории пойм обязателен учет границ водоохранных зон и прибрежных защитных полос, устанавливаемых в соответствии с действующими нормативами, накладывающими на строящиеся объекты дополнительные требования по водоотведению и очистке сточных вод.

Важно заметить, что в г. Краснодаре уже ведется работа в этом направлении. Так, многоквартирными домами постепенно застраивается территория в районе пересечения ул. Старокубанской и ул. Новой (рис. 2). В 2026 г в районе Старой Кубани открылся крупный образовательный комплекс «Поколение», площадью 12 га, территория вокруг которого была благоустроена (рис. 2), в том числе с обустройством берегоукреплений и организацией пространства набережной с пешеходными и велосипедными дорожками.



Рисунок 2 – Современные планировочные решения в районе поймы Старой Кубани

2. Функциональное зонирование территорий. В настоящий момент Единым документом территориального планирования и градостроительного зонирования муниципального образования город Краснодар установлен следующий функциональный состав территорий, расположенных вблизи поймы Старой Кубани (рис. 3): зоны многофункциональной общественной застройки и специализированной общественной застройки; зоны озелененных территорий общего пользования; зоны рекреационного назначения; зона озелененных территорий специального назначения; зона застройки многоэтажными жилыми домами (9 этажей и более); зона застройки индивидуальными домами; зона ведения садоводств [13].

В качестве градостроительных рекомендаций можно предложить некоторые корректировки по функциональному составу территорий в рассматриваемом районе. В частности, рациональным решением станет отказ от размещения на столь ценных для города территориях зоны озеленения специального назначения и зоны ведения садоводств, запланированных на перспективу до 2044 года. Также необходимо постепенно вынести в пригород существующие зоны застройки индивидуальными домами и зоны ведения садоводств, т.к. их нахождение на терри-

тории пойм нерационально. Вместо данных зон предложено организовать общественно-деловые зоны или жилые зоны с многоэтажной застройкой.

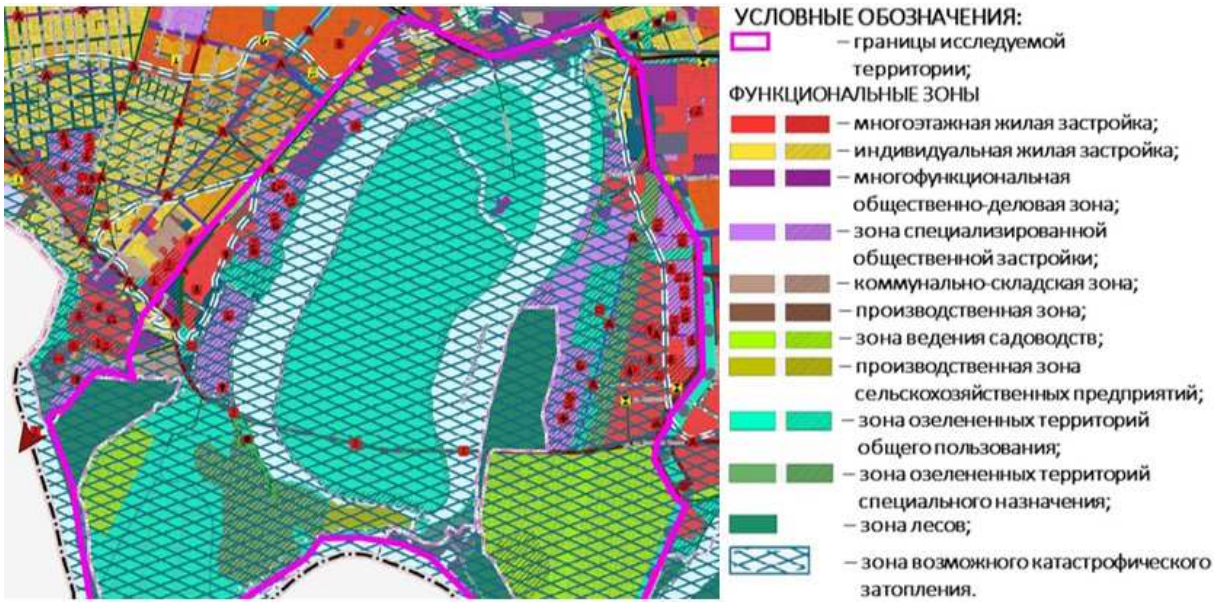


Рисунок 3 – Фрагмент карты функционального зонирования в районе поймы Старой Кубани

Во многих исследованиях пойменные территории предлагается выделять в отдельные зоны в рамках градо-климатического зонирования с учетом преобладающих факторов биоклимата [14]. Для таких зон должны предъявляться определенные требования с точки зрения градостроительства. В частности, крайне важно запретить размещение промышленных и производственных объектов. А в условиях поймы Старой Кубани необходимо обеспечить защиту от вредоносных выбросов действующих городских предприятий, которые нельзя вынести за границы городской черты вследствие их большой значимости (одно из таких предприятий – Краснодарская теплоэлектроцентраль, влияющая на качество воздуха и воды в данном районе) [12].

3. Организация улично-дорожной сети. Для пойменных территорий рекомендуется ключевые транспортные магистрали располагать в соответствии с преобладающим направлением ветровых потоков, в том числе с учетом циркуляции ветровых потоков вдоль русла Старой Кубани. Необходимо создавать протяженные набережные вдоль западного и восточного берегов Старой Кубани, а также обеспечивать их связность с остальной улично-дорожной сетью города.

В качестве ключевой транспортной артерии рассматриваемой территории выступает ул. Старокубанская, которая в 2026 г была частично продлена и реконструирована от ул. Новой до ул. Воронежской с расчетом на увеличение интенсивности движения. Согласно положениям Единого документа территориального планирования и градостроительного зонирования муниципального образования город Краснодар, территория в непосредственной близости от пойменной зоны Старой Кубани должна стать одним из важнейших транспортных узлов г. Краснодара [13]. Здесь предполагается соединить четыре важных направления: вышеупомянутая ул. Старокубанская, ул. Воронежская, а также две новые магистрали в сторону микрорайона Гидростроителей и аула Тахтамукай в Республике Адыгея со строительством мостов через реку Кубань и Старую Кубань (рис. 4).

4. Организация сети общественного транспорта. Для исследуемого района предлагается развивать электротранспорт, троллейбус и трамвай, в силу их большей экологичности в сравнении с автотранспортом. Существующие линии троллейбуса проходят в отдалении от района Старой Кубани, вследствие чего рекомендуется организация троллейбусного движения по ул. Старокубанской от круговой развязки на ул. Ставропольской до событийного места по ул. Обрывной (рис. 4). Движение трамвая осуществляется по ул. Воронежской и ул. Стасова в радиусе пешей доступности от новой застройки в районе Старой Кубани. При этом рекомендуется организовать задел для продления трамвайной линии по ул. Воронежской до перспективных районов застройки, а также рассмотреть его дальнейшее продление через Большой остров в микрорайон Гидростроителей параллельно планируемой автомобильной дороге (рис. 4).

5. Формирование планировочных акцентов. В дополнение к богатому рекреационному потенциалу территория поймы Старой Кубани обладает значимыми видовыми характеристиками (в особенности это касается вида на Большой остров, природа которого защищена статусом охранной зоны). В таких условия крайне важно предусмотреть сохранность видовых точек путем организации планировочных акцентов.



Рисунок 4 – Предлагаемая транспортная схема в районе поймы Старой Кубани

В качестве возможного места для планировочного акцента можно предложить видовую точку с ул. Трамвайной, к востоку от здания Торгово-промышленной палаты Краснодарского края. Данная территория размером 70–75 м в длину позволяет с высокого берега на большие расстояния обозревать панорамы города, в том числе охраняемые заповедные территории, что особенно актуально в условиях оживленного движения по указанной улице. Для жителей крупных спальных массивов на востоке г. Краснодара важно по дороге на работу и с работы видеть не только урбанистические, но и природные ландшафты.

Также для формирования планировочных акцентов можно предложить территории в районе образовательного комплекса «Поколение» и парка Старая Кубань.

Выводы. Таким образом, по результатам анализа территорий в пойменной зоне Старой Кубани, установлено:

1. Рекреационный потенциал пойменных территорий используется не в полной мере: долгое время земли близ Старой Кубани в г. Краснодаре использовались для целей промышленности, а также для размещения индивидуальной жилой застройки и садоводств.

2. Освоение и развитие данной территории является актуальной задачей, вследствие благоприятных биоклиматических характеристик пойменных территорий и близости к центрально части г. Краснодара (доступность 25–30 мин).

3. Планирование застройки и улично-дорожной сети должно вестись с учетом ведущих биоклиматических факторов среды пойменных территорий: близость к водному объекту; свободная циркуляция ветровых потоков параллельно течению.

4. Наиболее рациональным вариантом развития данной территории видится ее развитие посредством организации общественно-деловых и жилых многоэтажных зон с выносом в пригороды гаражей для стоянки автотранспорта, индивидуальной жилой застройки и зон ведения садоводств.

5. Для градостроительного развития пойменных территорий необходимо предусматривать формирование планировочных акцентов на месте ключевых вдовых точек, а также организацию событийных зон, как новых центров притяжения в районе.

Литература

1. Брагин В.И. Градостроительный анализ пойменных территорий реки Кубань в восточной части Краснодара / В.И. Брагин, Н.А. Дубиненко, А.П. Доманов // Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых: Материалы LIII студенческой научной конференции «Дни студенческой науки, 2026». – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2026. – С. 294–304. – URL : https://kubstu.ru/data/celist/CEM2431.pdf (дата обращения 04.09.2026).

2. Сокольская О.Н. Градоэкологические предпосылки к застройке черноморских городов Краснодарского края с учетом тепло-ветровых процессов / О.Н. Сокольская, А.И. Гиясов // Строительство: наука и образование. – 2020. – Т. 10. – № 3. – С. 39–56.
3. Гиясов А.И. Трансформация микроклиматических и биоклиматических условий урбанизированных территорий городов с жарким климатом / А.И. Гиясов, Ю.Г. Баротов; Институт строительства и архитектуры НИУ МГСУ // Функция, конструкция, среда в архитектуре зданий: Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 139–140.
4. Сокольская О.Н. Градо-климатическое районирование городов Черноморского побережья Краснодарского края с учётом особенностей ветрового режима / О.Н. Сокольская, Н.А. Дубиненко // Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития: Сборник трудов III Международного научно-практического симпозиума. – 2025. – С. 315–321. – URL : https://elibrary.ru/item.asp?id=89019244 (дата обращения 06.09.2026).
5. Василенко С.В. Объемно-планировочные решения зданий с учетом развития бризовых ветров (на примере Черноморского побережья Краснодарского края) / С.В. Василенко, О.Н. Сокольская // Градостроительство. – 2024. – № 1–2(89–90). – С. 45–50.
6. Сокольская О.Н. Роль бризовых ветров в формировании архитектурно-планировочной структуры приморских городов / О.Н. Сокольская, Р.А. Будаков, Н.А. Дубиненко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – Т. 25. – № 2. – С. 5–13.
7. Сокольская О.Н. Формирование микроклиматического комфорта городской среды Краснодара с учётом воздействия солнечной радиации / О.Н. Сокольская, Н.А. Дубиненко, Аваадех Хаммам И. Х. // Молодежная наука. Сборник лучших научных работ молодых ученых: Материалы LIII студенческой научной конференции «Дни студенческой науки, 2026». – Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2026. – С. 294–304. URL : https://kubstu.ru/data/celist/CEM2431.pdf. (дата обращения 04.09.2026).
8. Гиясов А. Формирование городской застройки с учетом экологических факторов атмосферной среды в жарких маловетреных и штилевых климатических условиях : монография / А. Гиясов, О.Н. Сокольская. – Краснодар : КубГТУ, 2016. – 140 с.
9. Сокольская О.Н. Влияние степени отражения солнечной радиации на формирование микроклимата городской среды на примере города Краснодара / О.Н. Сокольская, И.Х. Аваадех Хаммам, М.В. Литвяк // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы XI Международной научно-практической конференции. Направление конференции «Вызовы, стратегии и решения комплексного развития территорий», Тамбов, 28–29 мая 2025 года. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2025. – С. 147–151. – EDN PXYIBE
10. Сокольская О.Н. Историко-архитектурные предпосылки к созданию территории исторического поселения в городе Краснодаре / О.Н. Сокольская, Н.А. Дубиненко // Градостроительство. – 2024. – № 1–2(89 – 90). – С. 71–75.
11. Екатеринодар-Краснодар: Два века города в датах, событиях, воспоминаниях. – Краснодар: Кн. изд-во. – 800 с.
12. Пиров М. Проблемы градостроительного районирования территорий в условиях горно-долинного рельефа города Душанбе / М. Пиров, И.С. Шукуров // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2019. – Т. 9. – № 1(28). – С. 174–185. – URL : https:// www.elibrary.ru/item. asp?id=39326548. (дата обращения 27.08.2026).
13. «Единый документ территориально планирования и градостроительного зонирования муниципального образования город Краснодар. Материалы по обоснованию единого документа в части территориального планирования. Книга 1» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: Официальный сайт (дата обращения 28.08.2025).
14. Сокольская О.Н. Градо-климатическое зонирование города Новороссийска с учетом особенностей ветрового режима / О.Н. Сокольская, В.В. Каранова // Строительство: наука и образование. – 2022. – Т. 12. – № 4. – С. 33–45.

References

1. Bragin V.I. Urban planning analysis of the floodplain areas of the Kuban River in the eastern part of Krasnodar / V.I. Bragin, N.A. Dubinenko, A.P. Domanov // Youth Science. Collection of the best scientific works by young scientists: Materials of the LIII Student Scientific Conference «Days of Student Science, 2026». – Krasnodar : Kuban State Technological University, 2026. – P. 294–304. – URL : https://kubstu.ru/data/celist/CEM2431.pdf (date of application 04.09.2026).
2. Sokolskaya O.N. Urban ecological prerequisites for the development of Black Sea cities in the Krasnodar Territory, taking into account heat wind processes / O.N. Sokolskaya, A.I. Giyasov // Construction: Science and Education. – 2020. – Vol. 10. – № 3. – P. 39–56.

3. Giyasov A.I. Transformation of microclimatic and bioclimatic conditions of urbanized territories of cities with a hot climate / A.I. Giyasov, Yu.G. Barotov // Function, design, environment in building architecture: Collection of abstracts of the All–Russian Scientific and Practical Conference / Institute of Construction and Architecture NRU MGSU. – 2019. – P. 139–140.
4. Sokolskaya O.N. Urban and climatic zoning of the cities of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory, taking into account the peculiarities of the wind regime / O.N. Sokolskaya, N.A. Dubinenko // The future of the construction industry: Challenges and Prospects for Development: Collection of Proceedings of the III International Scientific and Practical Symposium. – 2025. – P. 315–321. – URL : https://elibrary.ru/item.asp?id=89019244 (date of application 09/06/2026).
5. Vasilenko S.V. Spatial planning solutions for buildings taking into account the development of breezy winds (on the example of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory) / S.V. Vasilenko, O.N. Sokolskaya // Urban planning. – 2024. – № 1–2(89–90). P. 45–50.
6. Sokolskaya O.N. The role of breeze winds in the formation of the architectural and planning structure of seaside towns / O.N. Sokolskaya, R.A. Budakov, N.A. Dubinenko // Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture. – 2025. – Vol. 25. – № 2. – P. 5–13.
7. Sokolskaya O. N. Formation of the microclimatic comfort of the urban environment in Krasnodar, taking into account the impact of solar radiation / O. N. Sokolskaya, N. A. Dubinenko, Avaadeh Hammam I. Kh. // Youth Science. Collection of the best scientific works by young scientists: Materials of the LIII Student Scientific Conference «Days of Student Science, 2026». – Krasnodar : Kuban State Technological University, 2026. – P. 294–304. – URL : https://kubstu.ru/data/celist/CEM2431.pdf (date of application 04.09.2026).
8. Giyasov A. Formation of urban development taking into account environmental factors of the atmospheric environment in hot, low wind, and calm climatic conditions : monograph / A. Giyasov, O.N. Sokolskaya. – Krasnodar : KubGTU, 2016. – 140 p.
9. Sokolskaya O.N. The Influence of the Degree of Solar Radiation Reflection on the Formation of the Microclimate of the Urban Environment: A Case Study of the City of Krasnodar / O.N. Sokolskaya I.Kh. Avaadeh Hammam, M.V. Litvyak // Sustainable Development of the Region: Architecture, Construction, Transport: Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. Conference Focus: «Challenges, Strategies, and Solutions for the Integrated Development of Territories», Tambov, May 28–29, 2025. – Tambov : Tambov State Technical University, 2025. – P. 147–151. EDN PXYIBE
10. Sokolskaya O.N. Historical and architectural prerequisites for the creation of a historical settlement territory in the city of Krasnodar / O.N. Sokolskaya, N.A. Dubinenko // Urban Planning. – 2024. – № 1–2(89–90). – P. 71–75.
11. Yekaterinodar-Krasnodar: Two centuries of the city in dates, events, and memories. – Krasnodar : Book Publishing House. – 800 p.
12. Pirov M. Problems of urban zoning in the mountain valley terrain of Dushanbe / M. Pirov, I.S. Shukurov // Proceedings of Higher Education Institutions. Investment. Construction. Realty. – 2019. – Vol. 9. – № 1(28). – P. 174–185. – URL : https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39326548 (date of application 27.08.2026).
13. «Unified document for territorial planning and urban zoning of the municipal entity of the city of Krasnodar. Materials for the justification of the unified document in terms of territorial planning. Book 1» // Electronic fund of legal and regulatory technical documents: Official website (date of application 28.08.2025).
14. Sokolskaya O.N. Urban climatic zoning of the city of Novorossiysk taking into account the characteristics of the wind regime / O.N. Sokolskaya, V.V. Karanova // Construction: science and education. – 2022. – Vol. 12. – № 4. – P. 33–45.

УДК 691.328

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА РЕКОНСТРУКЦИИ И УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АРМИРОВАННЫХ БАЗАЛЬТОВОЙ АРМАТУРОЙ БЕТОННЫХ ПЛИТ

♦♦♦♦♦

TECHNOLOGY FOR THE CONSTRUCTION PROCESS OF RECONSTRUCTION AND STRENGTHENING OF BUILDING STRUCTURES USING CONCRETE SLABS REINFORCED WITH BASALT REINFORCEMENT

Булгаков Алексей Григорьевич
доктор технических наук,
профессор,
главный научный сотрудник,
Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук;
профессор,
Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет
agi.bulgakov@mail.ru

Хольшемахер Клаус
доктор технических наук,
профессор,
Лейпцигский университет прикладных наук
klaus.holschemacher@htwk-leipzig.de

Асеев Вячеслав Юрьевич
аспирант,
Юго-Западный государственный университет
swsu_aseev@mail.ru

Шлеенко Алексей Васильевич
кандидат экономических наук,
доцент,
Юго-Западный государственный университет
shleenko77@mail.ru

Аннотация. В статье представлены основные принципы выбора материалов и технологические особенности производства базальтоармированных бетонных плит для реконструкции и усиления конструкций. Проведены испытания двух образцов с различными конфигурациями армирования (шнур Ø4 мм и лента 1,5 × 8 мм), подтвердившие преимущество шнура по несущей способности. Приведено экономическое обоснование технологии с расчётом затрат и снижением трудоёмкости на 25 % по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: базальтовая арматура; бетонные плиты; реконструкция; усиление; роботизированное производство; экономическая эффективность.

Bulgakov Alexey Grigorievich
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Chief Researcher,
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences;
Professor,
National Research Moscow State University of Civil Engineering
agi.bulgakov@mail.ru

Holschemacher Klaus
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Leipzig University of Applied Sciences
klaus.holschemacher@htwk-leipzig.de

Aseev Vyacheslav Yurievich
Postgraduate Student,
Southwest State University
swsu_aseev@mail.ru

Shleenko Alexey Vasilievich
Candidate of Economic Sciences,
Associate Professor,
Southwest State University
shleenko77@mail.ru

Annotation. The article presents the fundamental principles of material selection and the technological features of producing basalt-reinforced concrete slabs for the reconstruction and strengthening of structures. Tests of two samples with different reinforcement configurations (Ø4 mm cord and 1.5 × 8 mm tape) were conducted, confirming the superiority of cord in terms of load-bearing capacity. An economic justification for the technology is presented, including cost calculations and a 25 % reduction in labor intensity compared to traditional methods.

Keywords: basalt reinforcement; concrete slabs; reconstruction; strengthening; robotic production; economic efficiency.

Введение

Реконструкция и усиление зданий и сооружений остается одним из наиболее востребованных направлений промышленного и гражданского строительства. Это обусловлено как физическим и моральным износом, так и изменением нормативных требований к надежности, безопасности и долговечности конструкций. Дополнительную актуальность задача приобретает в сейсмически активных регионах, где конструктивные системы испытывают малоцикловые динамические воздействия и должны сохранять несущую способность при развитии трещинообразования и повреждений.

Не менее значимым фактором является эксплуатация объектов в агрессивных средах (хлориды, повышенная влажность, химически активные выбросы), приводящих к ускоренной деградации бетона и коррозии традиционного стального армирования. В этих условиях возрастает потребность в технологичных и экономически обоснованных методах реконструкции, обеспечивающих повышение трещиностойкости, долговечности и эксплуатационной надежности усиленных элементов.

Одним из перспективных подходов является применение бетонных плит, армированных базальтовой композитной арматурой (далее – БКА). Базальт характеризуется коррозионной и химической стойкостью и работоспособностью при повышенных температурах. Это позволяет рассматривать базальтоармированные бетонные плиты как потенциально эффективный элемент усиления конструкций, способный обеспечивать ограничение раскрытия трещин, повышение долговечности в агрессивных средах и повышение общей эксплуатационной устойчивости конструкций. Вместе с тем практическая применимость решения определяется подбором рационального процента армирования, технологией изготовления и монтажа плит, а также подтверждением эффективности по результатам испытаний и технико-экономического сравнения с альтернативными методами реконструкции.

Целью исследования является разработка эффективной технологии реконструкции и усиления строительных конструкций с применением бетонных плит, армированных БКА, и оценка её результативности на основе экспериментальных и расчетных данных.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Изучены свойства БКА и его влияния на прочностные и деформационные показатели бетона;
2. Разработана технология производства бетонных плит усиления, включая требования к составу смеси и контролю качества, а также даны рекомендации по монтажу готовых изделий;
3. Проведена экспериментальная проверка разработанной технологии с последующей обработкой и анализом результатов;
4. Приведено экономическое обоснование применения технологии: расчёт затрат на материалы и оборудование; оценка трудоёмкости работ по сравнению с традиционными методами.

Объектом исследования являются строительные конструкции, подлежащие реконструкции и усилению. Предметом исследования являются бетонные плиты, армированные БКА, применяемые в качестве элементов усиления.

В качестве методов исследования использованы лабораторные испытания материалов и образцов, математическое моделирование, эксплуатационно-ориентированные эксперименты, а также сравнительный анализ полученных результатов и технико-экономических показателей.

Теоретические основы применения базальтовой арматуры в строительстве

Поскольку БКА состоит из базальтовых волокон, начнём с их свойств. Базальтовое волокно (непрерывное или фибровое) относится к неорганическим волокнистым материалам, получаемым плавлением базальтового сырья с последующим формованием. Интерес к его применению в промышленном и гражданском строительстве обусловлен сочетанием высоких механических характеристик и эксплуатационной стойкости, что особенно важно для задач реконструкции и усиления конструкций, работающих в условиях переменных нагрузок, агрессивных сред и повышенных температурных воздействий.

Одним из ключевых свойств базальтового волокна является химическая стойкость [1]. Оно демонстрирует стабильность в ряде агрессивных сред, что позволяет рассматривать его как эффективный компонент для повышения долговечности бетонных композитов при воздействии влаги, солевых растворов и промышленных выбросов (таблица 1).

Таблица 1 – Химическая устойчивость базальтовых волокон

Наименование породы. (месторождение)	d, мкм	Значение показателя после обработки волокон в среде					
		H_20		2N HCl		2N NaOH	
		Xm	Xσ	Xm	Xσ	Xm	Xσ
Андезитобазальт (Подгорненское)	10.1	0,995	1,09	0,88	0,81	0,85	0,66
Базальт (Караканское)	6.3	0,997	1,10	0,90	0,78	0,78	0,64
Базальт (Берестовецкое)	11,4	0,993	1,08	0,78	0,47	0,89	0,41
Базальт (Марнеульское)	8,4	0,996	1,05	0,61	0,15	0,77	0,39

Существенным преимуществом является коррозионная стойкость, в том числе по отношению к хлоридам и щелочным средам, типичным для цементного камня [2, 3]. В отличие от стального армирования, базальт не подвержен электрохимической коррозии, что снижает риск

потери несущей способности из-за коррозионного распирания защитного слоя и последующего расслоения бетона.

Важным эксплуатационным фактором является термостойкость: базальтовое волокно способно сохранять работоспособность при повышенных температурах (в частности, указывается устойчивость к воздействиям свыше 800 °С) [3–5], что выгодно для конструкций с повышенными требованиями к пожарной безопасности и сохранению остаточной несущей способности после тепловых воздействий (табл. 2).

Таблица 2 – Остаточная прочность базальтоармированных бетонных плит при повышенных температурах

Температура °С	300	400	500	600	700
Исходная удельная прочность, 100 %					
№ 1234 кг/мм^2	98,7	88,7	58,9	38,4	25,0
№ 2240 кг/мм^2	99,0	89,0	61,0	39,0	27,0
№ 3254 кг/мм^2	100	90,0	65,0	38,8	28,6

Наряду с этим, материал характеризуется высокими показателями прочности [6,7], прежде всего на растяжение (табл. 3). При использовании БКА в составе бетона она воспринимает растягивающие напряжения в трещинообразующей зоне и повышает энергоёмкость разрушения, в результате улучшаются показатели трещиностойкости, ударной вязкости и сопротивления усталостному разрушению, что критично для реконструируемых элементов, работающих в условиях повторных и динамических воздействий.

Таблица 3 – Механические свойства непрерывной базальтовой арматуры

Номинальный диаметр (мм)		Максимальная прочность на растяжение	Безопасная прочность на растяжение	Модуль упругости	Удлинение при разрыве (мин. знач)
Внешн. диаметр	Внутр. диаметр	Мпа	МПа	ГПа	%
4	3,2	≥ 800	1050	≥ 60,00	2,5–3,2
5	4	≥ 800	1050	≥ 60,00	2,5–3,2
6	4,8	≥ 800	1050	≥ 60,00	2,5–3,2
7	5,8	≥ 800	950	≥ 55,00	2,5–3,2
8	6,8	≥ 800	950	≥ 55,00	2,5–3,2

Сравнивая БКА с альтернативными видами армирования, следует отметить ряд преимуществ. В сравнении со стальной арматурой – БКА выигрывает за счёт отсутствия коррозии, меньшей плотности (снижение массы на 75 %) и повышенной химической стойкости в агрессивных средах. [8]. По сравнению со стеклопластиковой арматурой – БКА часто рассматривается как более устойчивый к щелочной среде цементного камня (при корректном подборе состава и технологии), что повышает прогнозируемость долговечности композита [9]. В сопоставлении с углеродным композитным армированием [10] – БКА является существенно более доступным решением по стоимости для широкого круга задач усиления при достаточном уровне механических характеристик. Кроме того, углеродное композитное армирование обычно применяется в высокотехнологичных системах внешнего армирования, требующих строгого контроля адгезионных и технологических параметров. Таким образом, БКА может рассматриваться как компромиссное решение, обеспечивающее повышение эксплуатационной надёжности при приемлемой экономике, которую мы также подробнее рассмотрим.

Эффективность непрерывного армирования (стержневого или сетчатого) определяется не только прочностными характеристиками арматуры, но и условиями её совместной работы с бетоном. Арматурные стержни (либо их сетки) формируют в бетонном элементе несущую систему, воспринимающую растягивающие усилия и обеспечивающую требуемую трещиностойкость и деформативность конструкции. На ранних стадиях нагружения бетон и арматура работают совместно за счёт сцепления, однако при достижении предельных растягивающих деформаций в бетоне возникает трещина, и растягивающие напряжения перераспределяются на арматуру. В зонах трещин арматура фактически выполняет роль «перемычки», ограничивая раскрытие трещин и обеспечивая сохранение несущей способности элемента при дальнейшем увеличении нагрузки.

Совместная работа бетона и арматуры обеспечивается сцеплением на контактной поверхности, включающим адгезию, трение и механическое зацепление [11]. При недостаточной

анкеровке или неблагоприятных условиях контакта возможны характерные механизмы нарушения сцепления: проскальзывание стержня, выкол бетона по ребрам профиля, раскалывание защитного слоя и потеря анкерной способности. Поэтому на работоспособность непрерывного армирования существенно влияют диаметр, тип поперечного сечения армирования, длина анкеровки, толщина защитного слоя, наличие поперечной арматуры, а также качество бетона, его прочность и трещиностойкость.

Дополнительно следует учитывать технологические факторы, определяющие фактическое положение арматуры и качество контакта «бетон-арматура»: точность установки и фиксации каркасов, степень уплотнения смеси, отсутствие зон недостаточного уплотнения в защитном слое, а также условия твердения, влияющие на усадку и развитие ранних трещин. В совокупности перечисленные параметры определяют характер трещинообразования, величину раскрытия трещин и уровень деформаций конструкции, что необходимо учитывать при проектировании и обосновании решений по реконструкции и усилению железобетонных элементов.

При разработке материалов и технологий для реконструкции и усиления необходимо учитывать нормативные требования к надежности, долговечности и безопасности конструкций. В России требования к обеспечению надежности зданий и сооружений задаются системой нормативных документов по надежности и нагрузкам [12]. Требования к бетону и базальтобетонным конструкциям, включая правила расчета по предельным состояниям, требования к материалам, трещиностойкости и долговечности, регламентируются действующими нормами по бетонным конструкциям [13].

Для работ по реконструкции дополнительно актуальны документы, определяющие порядок обследования технического состояния [14], назначение расчетных схем по результатам обследования, а также требования к проектированию мероприятий по усилению и восстановлению несущей способности [15,16]. В части применения композитной арматуры важными являются требования к подтверждению характеристик материалов испытаниями [17], контролю качества при изготовлении и монтажных работах, а также к обоснованию долговечности в заданных условиях эксплуатации (включая агрессивные среды и температурные воздействия) [18, 19].

Таким образом, внедрение базальтовой арматуры в технологии усиления должно сопровождаться экспериментальным подтверждением заявленных характеристик и разработкой технологических регламентов, обеспечивающих воспроизводимость свойств и совместную работу нового усиления с существующей конструкцией.

Технология монтажа и усиления конструкций

Применение базальтоармированных бетонных плит в реконструкции и усилении конструкций предполагает не только корректный подбор материалов, но и правильную технологию монтажа, обеспечивающую совместную работу нового элемента с существующей конструкцией. Критически важными являются подготовка контактной поверхности, выбор способа крепления (передача сдвига и отрыва) и регламентированный контроль качества работ, поскольку именно на стадии монтажа формируются фактические условия работы контактной зоны.

Подготовку основания следует начинать с обследования и фиксации дефектов (трещины, отслоения, ослабленные зоны, коррозионные повреждения), так как это определяет объём ремонтных работ и допустимые способы крепления. Далее выполняют очистку поверхности от пыли, загрязнений, продуктов коррозии и других разделяющих слоёв. Повреждённые и слабодержащиеся участки удаляют до прочного основания с формированием работоспособной контактной зоны. При наличии локальных разрушений при необходимости выполняют восстановление геометрии, обеспечивая равномерность контактной поверхности и исключая пустоты под плитой. Непосредственно перед установкой плиты выполняют обработку поверхности адгезионными составами (грунтовками или праймерами), предусмотренными проектом и технологическим регламентом, чтобы повысить стабильность сцепления и снизить риск отслоения.

Способ крепления выбирают по расчётной схеме и условиям эксплуатации, применяя анкерное, клеевое и комбинированное решения. Анкерное крепление обеспечивает механическую передачу усилий и используется, когда требуется гарантированная работа узлов на отрыв и сдвиг, а также при ограничениях по применению клеевых систем (например, влажное основание или недопустимые для склеивания температурные условия). В этом случае важны разметка, соблюдение проектных расстояний и обеспечение требуемой затяжки анкеров в соответствии с ППР и технологическим регламентом.

Клеевое крепление реализуется через формирование клеевого (адгезионного) слоя между плитой и основанием; технологически оно требует тщательной подготовки поверхности и выдерживания условий нанесения и отверждения состава, поскольку отклонения приводят к снижению прочности сцепления и к преждевременному отслоению.

В ряде случаев рационально применять комбинированное крепление (клей + анкеры), в котором клеевой слой обеспечивает равномерную передачу контактных напряжений, а анкеры

повышают надежность в зонах концентрированных усилий и при воздействиях, способных вызвать отрыв.

В сейсмически активных районах к монтажу предъявляются повышенные требования по надежности креплений и качеству контактной зоны, поскольку малоцикловые воздействия увеличивают риск прогрессирующего отслаивания при дефектах сцепления или при наличии пустот. В агрессивных средах (влага, хлориды, химически активные выбросы) приоритетом является плотность прилегания и защищенность контактного слоя, так как проникновение влаги и ионов ускоряет деградацию бетона в зоне контакта и снижает долговечность системы усиления. На объектах с высокой динамической нагрузкой особенно важно исключить люфты, неплотности и неравномерную передачу усилий, поэтому предпочтение часто отдают решениям с повышенной технологической надежностью и усиленным контролем качества.

Контроль качества следует организовывать как входной, операционный и приемочный, с фиксацией результатов в исполнительной документации. В соответствии с требованиями СП 70.13330.2012 [18] контроль качества бетона и работ включает входной контроль по документам качества и испытаниям нормируемых показателей смеси, операционный контроль соблюдения режимов выполнения работ и условий твердения, а также приемочный контроль соответствия фактических показателей проектным. Применительно к монтажу плит ключевыми являются: проверка плотности прилегания (отсутствие пустот и «подпружинивания» плиты по контуру и в зоне опирания), контроль правильности расположения и усилия затяжки анкерных креплений, а также визуальный и инструментальный осмотр зоны контакта и узлов после завершения работ. При необходимости выполняют инструментальные проверки прочности/качества бетона и контактных зон в соответствии с предусмотренными методами контроля, включая неразрушающие методы и контроль по нормативным процедурам.

Экономическое обоснование

Разработанная технология производства и применения базальтоармированных бетонных плит обладает высокой экономической эффективностью, что подтверждено расчётами затрат на материалы, оборудования и трудоёмкостью работ по сравнению с традиционными методами усиления стальной арматурой [20]. Основные преимущества связаны со снижением массы армирования, исключением сварки, упрощением транспортировки и сокращением эксплуатационных расходов на ремонт из-за коррозии.

Для сравнения взят типичный объём производства – 7258 м³ сборного железобетона. При стальном армировании годовой расход арматуры составляет 351 т, а композитной (базальт) – 35 т, что даёт экономию материалов 315,88 т/год. Стоимость стальной арматуры – 18767362 руб/год, композитной – около 6,5 млн руб (с учётом цен 2019 г., скорректированных на инфляцию), экономия 12,2 млн руб/год или 66 % от затрат на арматуру (табл. 4). Дополнительно исключаются расходы на электроды для сварки (0,42 кг/м³ бетона, ~753 руб/год), итоговая экономия 485000 руб/год.

Таблица 4 – Сравнение годовых затрат на арматуру (7258 м³ бетона)

Арматура	Расход, т	Стоимость, руб	Экономия, руб
Стальная	351	18767362	–
Композитная	35	6500000	12267362

Изготовление армированных базальтовым волокном бетонных плит осуществляется роботизированным способом на гибкой производственной линии, что требует начальных вложений в оборудование, но окупается в течение 1,5–2 лет за счёт снижения трудоёмкости на 25 % (исключение вязки/сварки, автоматизация укладки). Трудоёмкость арматурных работ при композитной арматуре снижается на 25,7 % (табл. 5), что эквивалентно экономии 0,38 чел.-ч/м³ бетона или ~2,8 тыс. чел.-ч/год для рассматриваемого объёма. Общая себестоимость 1 м³ бетона падает на 66,72 руб (арматура) + 0,1 руб (вспомогательные материалы), итого ~67 руб/м³ или 486 000 руб/год. Дополнительный экономический эффект достигается за счет сокращения трудоемкости производственных операций. Исключение сварки и снижение объема ручных операций позволяют уменьшить продолжительность работ и повысить стабильность качества армирования.

Таблица 5 – Снижение трудоемкости работ

Операция	Сталь, чел.-ч/м^3	Композит, чел.-ч/м^3	Снижение, %
Арматурные работы	1,0	0,74	26
Сварка/обвязка	0,42	0	100
Итого	1,42	0,74	25,7

По сравнению с традиционным усилением стальной арматурой или сварными каркасами базальтовая технология снижает капитальные затраты на 20–30 % за счёт уменьшения массы (в 10 раз меньше арматуры) и упрощения монтажа (без сварки/зачистки коррозии). Эксплуатационные расходы падают за счёт отсутствия коррозии (срок службы увеличивается в 2–3 раза), что особенно актуально для реконструкции в агрессивных средах. Окупаемость роботизированной линии оценивается в 2 года при серийном производстве, с дальнейшей экономией ~12 млн руб/год.

Полученные данные подтверждают экономическую целесообразность технологии: снижение себестоимости на 25 %, трудоёмкости на 26 % и эксплуатационных рисков, что делает её конкурентоспособной альтернативой традиционным методам усиления.

Заключение

При применении базальтоармированных бетонных плит в реконструкции и усилении конструкций критически важными являются подготовка контактной поверхности, выбор способа крепления (передача сдвига и отрыва) и регламентированный контроль качества работ. Непосредственно перед установкой плиты выполняют обработку поверхности адгезионными составами (грунтовками или праймерами). Способ крепления выбирают по расчётной схеме и условиям эксплуатации, применяя анкерное, клеевое и комбинированное решения. В агрессивных средах приоритетом является плотность прилегания и защищенность контактного слоя. На объектах с высокой динамической нагрузкой особенно важно исключить люфты, неплотности и неравномерную передачу усилий. Контроль качества следует организовывать как входной, операционный и приемочный, с фиксацией результатов в исполнительной документации. Целесообразно выполнять инструментальные проверки прочности/качества бетона и контактных зон в соответствии с предусмотренными методами контроля, включая неразрушающие методы и контроль по нормативным процедурам.

Литература

1. Зимин Д.Е. Влияние химического состава стекла на стойкость базальтовых волокон к агрессивным средам / Д.Е. Зимин, О.С. Татаринцева // Ползуновский вестник. – 2010. – № 4-1.
2. Повышение коррозионной стойкости базальтового волокна в цементных бетонах / К.А. Сарайкина [и др.] // Construction materials. – 2016. – № 1–2.
3. Оснос С.П. О характеристиках базальтовых волокон и областях их применения // Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development. – 2010. – URL : http://basaltfm.com/ru/articles/article01.html (дата обращения 02.03.2026).
4. Исследование свойств функциональных базальтовых тканей для комплексной защиты зданий / С. Хамраева [и др.] // Universum: технические науки. – 2025. – № 11(140).
5. Исследование горючести базальтовой арматуры и сравнение ее основных характеристик с композитной и стальной арматурой / У.Т. Миржалилов [и др.] // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2022. – № 2(95).
6. Орлов М.А. [и др.] Прочностные свойства жгутов базальтовых волокон и микропластиков на их основе // Системные технологии. – 2018. – № 4(29).
7. Технический паспорт базальтовой арматуры // Basalt Uzbekistan. – 2023. – URL : https://basaltuzbekistan.com/wp-content/uploads/2023/07/TDS-armatura.pdf (дата обращения 02.03.2026).
8. Бронников И.В. Сравнительный анализ металлической арматуры и арматуры из композитных материалов // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – 2019. – № 3.
9. Исследование свойств композитной арматуры на основе стеклянных и базальтовых волокон / Н.В. Фролов [и др.] // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. – 2015. – № 3.
10. Прохоров В.Ю. Оптимизация и пути реализации армирования углеродных волокон при проектировании и изготовлении углерод-углеродных композиционных материалов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2007. – № 2. – С. 92–93.
11. Исследование физико-механических свойств дисперсно-армированных бетонов / Р.Ф. Серова [и др.] // Эпоха науки. – 2018. – № 14.
12. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. – М. : Минстрой России, 2016.
13. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М. : Минстрой России, 2018.
14. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : Российский институт стандартизации, 2024.
15. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – М. : Минстрой России, 2014.
16. СП 349.1325800.2017. Конструкции бетонные и железобетонные. Правила ремонта. – М. : Минстрой России, 2017.
17. ГОСТ Р 56795-2015. Композиты полимерные. – М. : Стандартинформ, 2015.

18. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. – М. : Минрегион России, 2012.
19. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, усиленные полимерной композитной арматурой. – М : Минстрой России, 2017.
20. Свиридович С.В. Экономическое обоснование использования композитной арматуры в армировании сборного железобетона / С.В. Свиридович; Редкол. О.С. Голубова [и др.]; Сост. Н.А. Пашкевич // Актуальные проблемы экономики и организации строительства: Сборник материалов студенческой научно-технической конференции в рамках 19-й Международной научно-технической конференции БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике», и 17-й студенческой научно-технической конференции БНТУ, 12–14 мая 2021 г. – Мн. : БНТУ, 2021. – С. 184–197.

References

1. Zimin D.E. Influence of the chemical composition of glass on the resistance of basalt fibers to aggressive environments / D.E. Zimin, O.S. Tatarintseva // Polzunovsky Vestnik. – 2010. – № 4-1.
2. Improving the corrosion resistance of basalt fiber in cement-based concrete / K.A. Saraykina [et al.] // Construction Materials. – 2016. – № 1–2.
3. Osnos S. P. On the characteristics of basalt fibers and areas of their application. Basalt Fiber & Composite Materials Technology Development, 2010. – URL : http://basaltfm.com/ru/articles/article01.html (date of application 02.03.2026).
4. Study of the properties of functional basalt fabrics for comprehensive protection of buildings / S.B. Khamraeva [et al.] // Universum: Technical Sciences. – 2025. – № 11(140).
5. Study of the flammability of basalt reinforcement and comparison of its main characteristics with composite and steel reinforcement / U.T. Mirzhalilov [et al.] // Universum: Technical Sciences. – 2022. – № 2(95).
6. Strength properties of basalt fiber bundles and microplastics based on them // M.A. Orlov [et al.] System Technologies. – 2018. – № 4(29).
7. Technical data sheet for basalt reinforcement. Basalt Uzbekistan, 2023. – URL : https://basaltuzbekistan.com/wp-content/uploads/2023/07/TDS-armatura.pdf (date of application 02.03.2026).
8. Bronnikov I.V. Comparative analysis of metal reinforcement and reinforcement made of composite materials. International Journal of Applied Sciences and Technologies «Integral». – 2019. – № 3.
9. Study of the properties of composite reinforcement based on glass and basalt fibers / N.V. Frolov [et al.] // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2015. – № 3.
10. Prokhorov V.Yu. Optimization and ways of implementing carbon fiber reinforcement in the design and manufacture of carbon-carbon composite materials. Reliability and Quality: Proceedings of the International Symposium. – 2007. – Vol. 2. – P. 92–93.
11. Study of physical and mechanical properties of dispersed-reinforced concretes / R.F. Serova [et al.] // Epoch of Science. – 2018. – № 14.
12. SP 20.13330.2016. Loads and Actions. Updated Edition of SNiP 2.01.07-85. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2016.
13. SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions. Updated Edition of SNiP 52-01-2003. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
14. GOST 31937-2024. Buildings and Structures. Rules for Inspection and Monitoring of Technical Condition. – M. : Russian Institute for Standardization, 2024.
15. SP 164.1325800.2014. Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Composite Materials. Design Rules. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2014.
16. SP 349.1325800.2017. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Repair Rules. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2017.
17. GOST R 56795-2015. Polymer Composites. – M. : Standartinform, 2015.
18. SP 70.13330.2012. Load-Bearing and Enclosing Structures. Updated Edition of SNiP 3.03.01-87. – M. : Ministry of Regional Development of Russia, 2012.
19. SP 295.1325800.2017. Concrete Structures Reinforced with Polymer Composite Reinforcement. M. : Ministry of Construction of Russia, 2017.
20. Sviridovich S.V. Economic Justification for the Use of Composite Rebar in the Reinforcement of Precast Reinforced Concrete / S.V. Sviridovich; Editorial Board: O.S. Golubova [et al.]; Compiled by N.A. Pashkevich // Current Issues in the Economics and Organization of Construction: Proceedings of the Student Scientific and Technical Conference, held as part of the 19th BNTU International Scientific and Technical Conference «Science for Education, Industry, and the Economy» and the 17th BNTU Student Scientific and Technical Conference, May 12–14, 2021. – Mn. : BNTU, 2021. – P. 184–197.

УДК 620.179.16

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗОНЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПОСЛЕ ПОЖАРА

♦♦♦♦♦

USE OF ULTRASOUND METHOD FOR ASSESSING THE REINFORCED CONCRETE DAMAGE ZONE AFTER A FIRE

Буракова М.М.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
mburakova2004@yandex.ru

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. Воздействие высоких температур при пожаре вызывает необратимые изменения в структуре железобетона, снижая его несущую способность и долговечность. Традиционные методы оценки повреждений – визуальный осмотр и отбор кернов с последующими механическими испытаниями – являются трудоёмкими, локальными и часто не позволяют получить полную картину глубины и степени термического поражения материала [1]. В работе рассматривается альтернативный подход – применение ультразвукового метода неразрушающего контроля для оценки зоны повреждения железобетона после пожара. Анализ скорости распространения ультразвуковых волн, их затухания и спектральных характеристик позволяет выявлять скрытые микроповреждения, дифференцировать степени термической деградации и количественно оценивать глубину поражённого слоя [2, 3]. В статье систематизированы данные отечественных и зарубежных исследований по применению ультразвукового метода для диагностики пожаро-поврежденного бетона. На основе анализа предложена классификация зон термического повреждения по скоростным параметрам ультразвука и рассмотрены практические аспекты проведения натурных обследований. Результаты показывают, что ультразвуковой метод обеспечивает достоверную и воспроизводимую оценку повреждений, открывая возможности для оперативного мониторинга состояния конструкций после пожара и обоснованного принятия решений о ремонте или усилении.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, скорость распространения ультразвуковых волн, железобетон, пожар, термическое повреждение, зона поражения, неразрушающий контроль, остаточная прочность, мониторинг конструкций.

Burakova M.M.
Student of group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
mburakova2004@yandex.ru

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. Exposure to high temperatures during a fire causes irreversible changes in the structure of reinforced concrete, reducing its carrying capacity and durability. The traditional methods of damage assessment – visual inspection and selection of cores followed by mechanical testing – are time-consuming, localized, and often do not provide a complete picture of the depth and degree of thermal damage of the material [1]. The work considers an alternative approach – application of ultrasonic method of non-destructive control to assess the area of reinforced concrete damage after a fire. Analysis of the propagation rate of ultrasonic waves, their attenuation and spectral characteristics allows to identify hidden microdamage, differentiate degrees of thermal degradation and quantify depth of affected layer [2, 3]. The article systemises data from domestic and foreign studies on the application of ultrasound method for diagnosis of fire-damaged concrete. On the basis of analysis, a classification of thermal damage zones according to ultrasonic speed parameters and practical aspects of carrying out field surveys are proposed. Results show that the ultrasound method provides a reliable and reproducible assessment of damage, opening up opportunities for rapid monitoring of the condition of structures after fire and informed decision-making on repair or reinforcement.

Keywords: ultrasonic method, speed of propagation of ultrasonic waves, iron concrete, fire, thermal damage, area of impact, non-destructive control, residual strength, monitoring of structures.

Ежегодно в России и за рубежом значительное количество железобетонных конструкций подвергается воздействию высоких температур при пожарах. Пожарное воздействие приводит к прогрессирующему снижению прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры, что в ряде случаев создаёт угрозу обрушения конструкций и требует принятия безотлагательных решений о возможности дальнейшей эксплуатации. Обеспе-

чение безопасной эксплуатации зданий после пожара невозможно без достоверной оценки степени повреждения несущих элементов.

Традиционная методика обследования повреждённых конструкций, как правило, включает визуальный осмотр, измерение глубины карбонизации, отбор кернов и испытание образцов на сжатие [1]. Однако отбор кернов является разрушающим методом, трудоёмким и не всегда допустимым для конструкций с высокой степенью армирования. Кроме того, точечный характер отбора проб не позволяет получить полную информацию о распределении повреждений по сечению и длине элемента. В условиях необходимости оперативной оценки состояния большого числа конструкций возникает потребность в применении эффективных неразрушающих методов диагностики [2].

Развитие методов неразрушающего контроля открывает новые возможности для оценки термических повреждений строительных материалов. Ультразвуковой метод, основанный на регистрации параметров распространения упругих волн в материале, позволяет получать информацию о его внутренней структуре, скрытую при визуальном осмотре. Скорость распространения ультразвуковых волн (UPV) является интегральным показателем, чувствительным к изменениям плотности, упругости и сплошности материала [3, 4]. Воздействие высоких температур вызывает в бетоне комплекс физико-химических превращений: дегидратацию связанной воды, термическую несовместимость заполнителей и цементного камня, прогрессирующее микротрещинообразование и фазовые превращения [5, 7]. Каждое из этих изменений отражается на скорости распространения ультразвука, что даёт основание для количественной оценки степени термического повреждения.

Целью настоящей работы является обобщение опыта применения ультразвукового метода для оценки зоны повреждения железобетона после пожара, а также определение подходов к интерпретации получаемых данных для практического использования.

Физические основы ультразвукового метода

Физической основой метода служит зависимость скорости распространения упругих волн от упругих свойств и плотности материала. В ультразвуковых приборах используется генератор импульсов, преобразователь, излучающий ультразвуковые колебания, и приёмный преобразователь, регистрирующий время прохождения сигнала через контролируемый участок. По измеренному времени и известному расстоянию между преобразователями вычисляется скорость распространения продольной волны [4].

Для не повреждённого пожаром бетона плотных составов скорость ультразвука составляет 4,5–5,0 км/с. При нагреве до 300 °C скорость снижается примерно до 3,0 км/с, а после воздействия температуры 600 °C – до значений менее 1,5 км/с [5, 7]. Столь значительное изменение скоростного параметра делает метод высокочувствительным к термическим повреждениям.

Помимо скорости, информативными параметрами являются затухание ультразвуковых волн, изменение формы сигнала и спектральные характеристики. При развитии микротрещин и увеличении пористости материала затухание возрастает, а форма импульса искажается. Современные исследования показывают, что нелинейные ультразвуковые методы, такие как нелинейная резонансная ультразвуковая спектроскопия (NRUS), позволяют выявлять градиенты термических повреждений по глубине с разрешением до 2 см [8].

Методика ультразвуковой оценки термических повреждений

Обработка результатов ультразвуковых измерений включает несколько этапов. Первоначально выполняется калибровка оборудования и выбор схемы измерений. Различают прямую (сквозную), полупрямую и поверхностную схемы прозвучивания. Для оценки глубины повреждённого слоя наиболее информативной является поверхностная схема, при которой излучающий и приёмный преобразователи располагаются на одной поверхности контролируемого элемента. Измерения выполняются при различных базах прозвучивания, что позволяет построить профиль изменения скорости по глубине [5].

Затем производится расчёт скоростных параметров и их сравнение с эталонными значениями для не повреждённого бетона того же состава. В качестве эталона могут использоваться участки конструкции, заведомо не подвергавшиеся нагреву, или результаты измерений на контрольных образцах.

На основе анализа скоростных параметров может быть выполнена классификация зон термического повреждения. В таблице 1 представлены обобщённые данные о зависимости скорости ультразвука от температуры нагрева бетона, систематизированные по результатам опубликованных исследований [4, 5, 7].

Для повышения достоверности оценки рекомендуется использовать комплексный подход, сочетающий ультразвуковой метод с другими неразрушающими методами, в частности с методом упругого отскока (склерометрией). Ультразвук в сочетании с методом упругого отскока и измерением глубины карбонизации позволяет с высокой точностью оценить остаточную прочность бетона и определить максимальную температуру нагрева [5, 7].

Таблица 1 – Классификация зон термического повреждения бетона по скорости ультразвука

Температура нагрева	Скорость UPV, км/с	Степень повреждения	Характерные изменения
20–100 °C (норма)	4,0–5,0	Отсутствует / слабая	Испарение свободной воды
100–300 °C	3,0–4,0	Умеренная	Дегидратация, начало микротрещин
300–600 °C	1,5–3,0	Значительная	Интенсивное микротрещинообразование, снижение прочности на 40–70 %
> 600 °C	< 1,5	Критическая	Разрушение структуры, потеря несущей способности

Оценка глубины зоны повреждения

Одной из наиболее важных задач при обследовании конструкций после пожара является определение глубины повреждённого слоя. При пожаре внешняя поверхность элемента нагревается значительно сильнее, чем внутренние слои, поэтому повреждения имеют ярко выраженный градиентный характер [8].

Ультразвуковой метод позволяет количественно оценить глубину поражения путём измерения скорости поверхностной волны при различных базах прозвучивания. С уменьшением базы прозвучивания возрастает доля поверхностного слоя в интегральной оценке скорости. Сравнивая результаты измерений с разными базами, можно построить профиль изменения свойств по глубине [5].

Для более точной оценки глубины повреждения применяется керн-ультразвуковой метод, при котором из конструкции извлекается керн, а затем выполняется послойное ультразвуковое прозвучивание. Этот метод позволяет с высокой точностью определить границу между повреждённым и не повреждённым слоями бетона [8].

Особое внимание следует уделять зонам концентрации напряжений и участкам примыкания арматуры. Термическое расширение арматуры при нагреве создаёт дополнительные напряжения в окружающем бетоне, что приводит к образованию трещин вдоль арматурных стержней. Ультразвуковой метод позволяет выявлять такие зоны по аномальному снижению скорости и увеличению затухания сигнала [7].

Факторы, влияющие на достоверность ультразвуковой оценки

При интерпретации результатов ультразвуковых измерений необходимо учитывать ряд факторов, способных исказить получаемые данные.

Влажность бетона. Наличие воды в порах существенно влияет на скорость распространения ультразвука. После пожара конструкции могут находиться в различных влажностных состояниях – от полностью высушенных до насыщенных водой при тушении пожара. Для корректной интерпретации результатов рекомендуется проводить измерения после стабилизации влажностного состояния или вносить соответствующие поправки [7].

Состав бетона. Вид и гранулометрия заполнителя, водоцементное отношение, наличие добавок – все эти факторы влияют на исходную скорость ультразвука и на характер её изменения при нагреве. Поэтому для каждого конкретного состава бетона требуется установление эталонных зависимостей [4].

Постпожарное твердение. После пожара в бетоне могут протекать процессы регидратации, частично восстанавливающие его свойства. Скорость ультразвука при этом может возрастать, что создаёт риск недооценки фактического повреждения. Нелинейные ультразвуковые методы, как показано в исследованиях [8], сохраняют чувствительность к пожарным повреждениям даже после длительного твердения.

Интенсивное трещинообразование. При очень высоких температурах (> 600 °C) обширное трещинообразование может сделать ультразвуковые измерения затруднительными из-за сильного рассеяния и затухания сигнала. В таких случаях требуется комбинирование ультразвукового метода с другими методами контроля [5].

В таблице 2 приведены обобщённые рекомендации по применению ультразвукового метода для различных диагностических задач на основе анализа литературы [5, 8, 9].

Таблица 2 – Рекомендуемые параметры ультразвукового контроля

Задача диагностики	Схема прозвучивания	Частота преобразователей, кГц	Информативные параметры
1	2	3	4
Оценка остаточной прочности	Сквозная / полупрямая	50–150	Скорость P-волны
Определение глубины повреждения	Поверхностная (разные базы)	50–100	Профиль скорости по глубине

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
Выявление зон микротрещинообразования	Сквозная	100–500	Затухание, форма сигнала
Детальный послойный анализ	По керну (натурные образцы)	24–500	Скорость, нелинейные параметры
Мониторинг постпожарного восстановления	Сквозная / полупрямая	50–150	Скорость, нелинейный параметр α

Практические аспекты применения метода

Для внедрения ультразвукового метода в практику обследования повреждённых конструкций необходимо решение ряда организационных и методических вопросов. Прежде всего, требуется наличие нормативной базы, регламентирующей порядок проведения измерений, обработку данных и интерпретацию результатов. В настоящее время отдельные методические подходы отражены в ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [1], однако специализированных нормативных документов по ультразвуковой диагностике пожарных повреждений недостаточно.

Важным аспектом является калибровка оборудования и учёт условий измерений. Как показано в исследованиях [9], метрологически обоснованная калибровка позволяет снизить разброс результатов и повысить воспроизводимость измерений. Расширенная неопределённость измерений скорости при соблюдении метрологических процедур составляет от 1,0 до 30 м/с, что в худшем случае не превышает 1 %.

Для оперативной оценки больших площадей повреждённых конструкций целесообразно использовать методы скоростного картирования. При этом измерения выполняются с фиксированным шагом по поверхности элемента, что позволяет построить карты распределения скорости ультразвука. Такие карты наглядно показывают зоны максимальных повреждений и их границы [5].

Перспективным направлением является применение методов машинного обучения для классификации степени термических повреждений по ультразвуковым сигналам. Как показывают исследования [10], использование линейных (скорость) и нелинейных (когерентность) параметров в сочетании с алгоритмами машинного обучения позволяет достичь точности классификации до 76 %.

Заключение

Ультразвуковой метод представляет собой эффективное средство неразрушающего контроля для оценки зоны повреждения железобетона после пожара. Технология позволяет количественно определять степень термической деградации материала, выявлять скрытые микроповреждения и оценивать глубину поражённого слоя [2–5, 7, 8]. Наиболее достоверные результаты достигаются при комплексном применении ультразвукового метода с другими неразрушающими методами (упругий отскок, визуальный осмотр) и при учёте факторов, влияющих на распространение ультразвука (влажность, состав бетона, постпожарное твердение) [5, 7, 9].

Таким образом, в результате выполнения работы был обобщён опыт применения ультразвукового метода для оценки термических повреждений железобетонных конструкций. Установлено, что традиционные визуальные и разрушающие методы обследования обладают ограниченной информативностью в отношении скрытых дефектов и не позволяют получить полную картину распределения повреждений по сечению элемента [1], тогда как анализ скоростных параметров ультразвука и их пространственного распределения даёт возможность выявлять зоны термического поражения на ранних стадиях и количественно оценивать глубину повреждённого слоя [5, 8]. Дальнейшее развитие метода связано с совершенствованием метрологического обеспечения, разработкой специализированных нормативных документов и внедрением алгоритмов автоматизированной обработки данных [9, 10].

Литература

1. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : Стандартинформ, 2012. – 55 с.
2. Чжоу Б. Применение ультразвукового метода для оценки остаточной прочности бетона после высокотемпературного воздействия / Б. Чжоу, Ц. Ли // Бетон и железобетон. – 2021. – № 4. – С. 22–29.
3. Насименто М.А. Ультразвуковой контроль для оценки остаточной прочности бетона: обзор / М.А. Насименто, М.А. до Насименто // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 375. – Art. 130887.

4. Chung H.W. Assessing Fire Damage of Concrete by the Ultrasonic Pulse Technique / H.W. Chung, K.S. Law // Cement, Concrete and Aggregates. – 1985. – Vol. 7. – № 2. – P. 84–88.
5. Felicetti R. New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures // Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting. – 2008. – P. 345–352.
6. Assessment of Thermomechanical Coupling Damage in Concrete Using Ultrasonic Pulse and Acoustic Emission Techniques / L.H. Chen [et al.] // Advances in Civil Engineering. – 2025. – Art. 8446241.
7. Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy for profiling thermal damage gradients and monitoring post-fire recovery in concrete / M. Fengal [et al.] // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 458. – Art. 139456.
8. Metrological ultrasonic evaluation for hierarchical classification of fire-induced thermal damage in concrete // Measurement. – 2026. – Vol. 235. – Art. 116212.
9. Кашеварова Г.Г. Разработка программы для автоматической оценки технического состояния наружных стен кирпичных зданий на основе методов машинного обучения / Г.Г. Кашеварова, С.А. Крылов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. – 2025. – Т. 52. – № 1. – С. 120–129.

References

1. GOST 31937-2011. Buildings and structures. Regulations for the inspection and monitoring of technical condition. – M. : Standardinform, 2012. – 55 p.
2. Zhou B. Application of ultrasound method to assess the residual strength of concrete after high-temperature exposure / B. Zhou, C. Lee // Concrete and reinforced concrete. – 2021. – № 4. – P. 22–29.
3. Nascimento M.A. Ultrasonic testing for the assessment of residual concrete strength: a review / M.A. Nascimento, M.A. do Nascimento // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 375. Art. 130887.
4. Chung H.W. Assessing Fire Damage of Concrete by the Ultrasonic Pulse Technique / H.W. Chung, K.S. Law // Cement, Concrete and Aggregates. – 1985. – Vol. 7. – № 2. – P. 84–88.
5. Felicetti R. New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures // Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting. 2008. – P. 345–352.
6. Assessment of Thermomechanical Coupling Damage in Concrete Using Ultrasonic Pulse and Acoustic Emission Techniques / L.H. Chen [et al.] // Advances in Civil Engineering. 2025. Art. 8446241.
7. Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy for profiling thermal damage gradients and monitoring post-fire recovery in concrete / M. Fengal [et al.] // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 458. Art. 139456.
8. Metrological ultrasonic evaluation for hierarchical classification of fire-induced thermal damage in concrete // Measurement. 2026. Vol. 235. Art. 116212.
9. Kashevarova G.G. Development of a program for automatic technical evaluation of the condition of exterior walls of brick buildings based on machine learning methods / G.G. Kashevarova, S.A. Krylov // Gazette of Dagestan State Technical University. – 2025. – Vol. 52. – № 1. – P. 120–129.

УДК 624.012.45

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ АРМИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

♦♦♦♦♦

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR REINFORCEMENT OPTIMIZATION AND DURABILITY PREDICTION

Буракова М.М.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
mburakova2004@yandex.ru

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. Воздействие агрессивных факторов окружающей среды и необходимость обеспечения сейсмостойкости железобетонных конструкций вызывают необходимость комплексного подхода к оптимизации армирования и прогнозированию долговечности. Традиционные методы проектирования, основанные на эмпирических зависимостях и упрощённых моделях, обладают ограниченной точностью при учёте сложных нелинейных взаимодействий между параметрами армирования, условиями эксплуатации и деградационными процессами. В статье систематизированы данные отечественных и зарубежных исследований по применению методов искусственного интеллекта для решения задач оптимизации армирования и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций. На основе анализа предложена классификация подходов машинного обучения по типу решаемых задач и рассмотрены практические аспекты внедрения данных методов. Результаты показывают, что алгоритмы машинного обучения обеспечивают достоверную и воспроизводимую оценку оптимальных параметров армирования и прогнозирование остаточного ресурса конструкций, открывая возможности для оперативного принятия решений о техническом состоянии и стратегиях обслуживания.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, оптимизация армирования, прогнозирование долговечности, железобетон, неразрушающий контроль, остаточная прочность, мониторинг конструкций, управление жизненным циклом.

Burakova M.M.
Student of group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
mburakova2004@yandex.ru

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. Exposure to aggressive environmental factors and the need to ensure seismic resistance of reinforced concrete structures necessitate an integrated approach to reinforcement optimization and durability prediction. Traditional design methods based on empirical relationships and simplified models have limited accuracy when accounting for complex nonlinear interactions between reinforcement parameters, operating conditions, and degradation processes. The article systematises data from domestic and foreign studies on the application of artificial intelligence methods for solving problems of reinforcement optimization and durability prediction of reinforced concrete structures. Based on the analysis, a classification of machine learning approaches by type of problems to be solved is proposed, and practical aspects of implementing these methods are considered. Results show that machine learning algorithms provide reliable and reproducible assessment of optimal reinforcement parameters and prediction of residual service life of structures, opening up opportunities for rapid decision-making on technical condition and maintenance strategies.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, reinforcement optimization, durability prediction, reinforced concrete, nondestructive testing, residual strength, structural monitoring, life-cycle management.

Ежегодно в России и за рубежом значительное количество железобетонных конструкций подвергается воздействию агрессивных сред, циклических нагрузок и экстремальных климатических условий. Коррозионные процессы, хлоридная агрессия и карбонизация приводят к прогрессирующему снижению прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры, что в ряде случаев создаёт угрозу обрушения конструкций и требует принятия безотлагательных решений о возможности дальнейшей эксплуатации. Обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений невозможно без достоверной оценки остаточного ресурса несущих элементов и обоснованного выбора параметров усиления.

Традиционная методика проектирования и оценки долговечности, как правило, включает использование эмпирических зависимостей, основанных на упрощённых предположениях о характере деградационных процессов [1]. Однако такие модели не позволяют в полной мере учесть сложные нелинейные взаимосвязи между многочисленными факторами, влияющими на

долговечность: составом бетона, условиями эксплуатации, температурно-влажностным режимом, интенсивностью коррозионного поражения арматуры. Кроме того, точечный характер отбора проб при натурных обследованиях не позволяет получить полную информацию о распределении повреждений по сечению и длине элемента. В условиях необходимости оперативной оценки состояния большого числа конструкций возникает потребность в применении эффективных вычислительных методов [2].

Развитие методов искусственного интеллекта открывает новые возможности для оценки и прогнозирования состояния строительных материалов и конструкций. Алгоритмы машинного обучения, основанные на выявлении скрытых закономерностей в больших массивах данных, позволяют получать информацию о внутренней структуре и характере деградационных процессов, недоступную при использовании традиционных аналитических моделей. Точность прогнозирования остаточного ресурса является интегральным показателем, чувствительным к изменениям параметров армирования, условий эксплуатации и сплошности материала [3]. Воздействие агрессивных факторов вызывает в железобетоне комплекс физико-химических превращений: коррозию арматуры, деградацию защитного слоя бетона, прогрессирующее микротрещинообразование и снижение сцепления арматуры с бетоном [4]. Каждое из этих изменений отражается на несущей способности конструкции, что даёт основание для количественной оценки степени повреждения с применением методов машинного обучения.

Целью настоящей работы является обобщение опыта применения методов искусственного интеллекта для оптимизации армирования и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций, а также определение подходов к интерпретации получаемых данных для практического использования.

Физические основы применения методов машинного обучения

Физической основой применения методов машинного обучения в задачах оценки долговечности и оптимизации армирования служит зависимость остаточной несущей способности конструкции от множества взаимосвязанных параметров: геометрических характеристик сечения, процента армирования, класса бетона, толщины защитного слоя, условий эксплуатации и интенсивности внешних воздействий. В отличие от традиционных эмпирических моделей, которые используют фиксированные функциональные зависимости, алгоритмы машинного обучения способны выявлять сложные нелинейные закономерности непосредственно из данных.

Для оценки долговечности конструкций, подверженных коррозионному воздействию, традиционные модели основаны на учёте скорости коррозии, диаметра арматуры и глубины защитного слоя с использованием фундаментальных математических формул [5]. Однако такие модели основаны на упрощённых предположениях и не учитывают гетерогенные свойства бетона, его проницаемость и взаимодействие между температурными эффектами и сцеплением арматуры с бетоном. Методы машинного обучения позволяют преодолеть эти ограничения, обеспечивая более точное прогнозирование остаточного ресурса конструкций [6].

Современные исследования показывают, что ансамблевые методы, такие как LightGBM и XGBoost, демонстрируют высокую эффективность при прогнозировании жизненного цикла железобетонных конструкций в морских и прибрежных условиях [7]. Использование методов интерпретации моделей, в частности SHAP-анализа, позволяет не только получать прогнозные значения, но и выявлять относительную важность отдельных факторов, влияющих на долговечность, что имеет важное значение для практического применения.

Помимо прогнозирования долговечности, методы машинного обучения успешно применяются для оптимизации параметров армирования и усиления конструкций. Исследования показывают, что алгоритмы машинного обучения позволяют быстро оценивать несущую способность, прогнозировать структурный отклик и определять оптимальные параметры усиления, обеспечивая точную и эффективную вычислительную поддержку [8]. Это открывает широкие возможности для практического применения в задачах проектирования и реконструкции.

Методика применения методов машинного обучения для оптимизации армирования

Обработка результатов применения методов машинного обучения включает несколько этапов. Первоначально выполняется сбор и подготовка данных, включающих параметры конструкций, условия эксплуатации, результаты натурных обследований и лабораторных испытаний. Различают задачи регрессии, классификации и оптимизации, для решения которых применяются различные алгоритмы: случайный лес, градиентный бустинг, нейронные сети и ансамблевые методы [9].

Затем производится обучение модели на подготовленном наборе данных с использованием методов кросс-валидации для оценки обобщающей способности. В качестве критериев качества используются коэффициент детерминации (R^2), средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE). Для оптимизации гиперпараметров модели применяются

методы байесовской оптимизации, позволяющие автоматически настраивать параметры алгоритма для достижения наилучшей точности [7].

На основе анализа прогнозных значений может быть выполнена классификация степени повреждения и оптимизация параметров армирования. В таблице 1 представлены обобщённые данные о зависимости остаточной несущей способности от степени коррозионного поражения арматуры, систематизированные по результатам опубликованных исследований [4, 6].

Таблица 1 – Классификация степени повреждения железобетонных конструкций по остаточной несущей способности

Степень коррозии арматуры	Остаточная несущая способность, %	Степень повреждения	Характерные изменения
Отсутствует (норма)	90–100	Отсутствует / слабая	Начало коррозионных процессов, незначительное снижение сцепления
Слабая (до 5 % потери сечения)	70–90	Умеренная	Коррозия арматуры, начало микротрещинообразования в защитном слое
Средняя (5–15 % потери сечения)	50–70	Значительная	Интенсивное трещинообразование, снижение прочности сцепления, коррозионное растрескивание
Сильная (более 15 % потери сечения)	менее 50	Критическая	Разрушение защитного слоя, потеря несущей способности, оголение арматуры

Для повышения достоверности оценки рекомендуется использовать комплексный подход, сочетающий методы машинного обучения с традиционными неразрушающими методами контроля, в частности с ультразвуковым методом и методом упругого отскока. Применение методов машинного обучения в сочетании с измерением глубины карбонизации позволяет с высокой точностью оценить остаточную прочность бетона и определить оптимальные параметры усиления [3, 5].

Прогнозирование долговечности конструкций

Одной из наиболее важных задач при оценке технического состояния конструкций является определение остаточного ресурса и прогнозирование изменения несущей способности во времени. При воздействии агрессивных сред поверхностные слои бетона и арматуры повреждаются значительно сильнее, чем внутренние, поэтому деградационные процессы имеют ярко выраженный градиентный характер [7].

Методы машинного обучения позволяют количественно оценить остаточный ресурс конструкции путём анализа совокупности входных параметров, включающих характеристики материалов, условия эксплуатации и результаты мониторинга. Сравнение прогнозных значений с результатами натурных обследований позволяет построить профиль изменения свойств во времени и определить оптимальные сроки проведения ремонтных работ [6].

Для более точной оценки долговечности применяются гибридные подходы, сочетающие методы машинного обучения с физическими моделями деградации. В частности, ансамблевые методы, такие как LightGBM, в сочетании с байесовской оптимизацией гиперпараметров позволяют достичь высокой точности прогнозирования при ограниченном объёме обучающих данных [7].

Факторы, влияющие на достоверность оценок

При интерпретации результатов применения методов машинного обучения необходимо учитывать ряд факторов, способных исказить получаемые данные.

Качество и объём обучающих данных. Наличие репрезентативной выборки, охватывающей широкий диапазон условий эксплуатации и характеристик конструкций, существенно влияет на точность прогнозирования. Для корректной интерпретации результатов рекомендуется использовать методы кросс-валидации и оценивать неопределённость модели [5].

Интерпретируемость моделей. Сложные модели машинного обучения, такие как нейронные сети, обладают ограниченной интерпретируемостью. Использование методов объяснимого искусственного интеллекта, в частности SHAP-анализа, позволяет выявлять относительную важность отдельных факторов и повышать доверие к результатам прогнозирования [7].

Учёт временной динамики. Процессы деградации железобетонных конструкций носят временной характер. Методы машинного обучения, учитывающие временные ряды, в частности рекуррентные нейронные сети и LSTM-архитектуры, сохраняют чувствительность к изменениям параметров состояния даже при длительных сроках эксплуатации [9].

Верификация на натурных объектах. Применение методов машинного обучения требует обязательной верификации полученных результатов на реальных конструкциях. Как показано в исследованиях [8], использование данных натурных обследований для валидации моделей позволяет подтвердить их эффективность и обеспечить практическую применимость.

В таблице 2 приведены обобщённые рекомендации по применению методов машинного обучения для различных диагностических задач на основе анализа литературы [3, 6, 7, 9].

Таблица 2 – Рекомендуемые методы машинного обучения для задач диагностики и оптимизации

Задача диагностики	Тип алгоритма	Информативные параметры	Ожидаемая точность
Оценка остаточной прочности	Ансамблевые методы (LightGBM, XGBoost)	Скорость ультразвука, глубина карбонизации, диаметр арматуры	$R^2 > 0,85$
Прогнозирование долговечности	Ансамблевые методы с байесовской оптимизацией	Условия эксплуатации, состав бетона, коррозионная активность	MAE < 10 %
Оптимизация параметров усиления	Случайный лес, нейронные сети	Геометрия сечения, процент армирования, класс бетона	$R^2 > 0,80$
Классификация степени повреждения	Градиентный бустинг, SVM	Результаты неразрушающего контроля, визуальные признаки	Точность > 75 %
Мониторинг деградационных процессов	LSTM, рекуррентные нейронные сети	Временные ряды измерений, параметры окружающей среды	RMSE < 5 %

Практические аспекты применения методов

Для внедрения методов машинного обучения в практику обследования и проектирования необходимо решение ряда организационных и методических вопросов. Прежде всего, требуется наличие нормативной базы, регламентирующей порядок применения данных методов, обработку результатов и интерпретацию прогнозов. В настоящее время отдельные методические подходы отражены в ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [1], однако специализированных нормативных документов по применению искусственного интеллекта для оценки долговечности конструкций недостаточно.

Важным аспектом является обеспечение качества и репрезентативности обучающих данных. Как показано в исследованиях [5], включение в модель более полных и разнообразных данных, учитывающих характеристики материалов, условия эксплуатации и результаты мониторинга, позволяет повысить точность прогнозирования и обеспечить практическую применимость результатов.

Для оперативной оценки больших площадей конструкций целесообразно использовать методы скоростного картирования с применением алгоритмов машинного обучения. При этом результаты неразрушающего контроля используются в качестве входных параметров для прогнозирования остаточного ресурса, что позволяет построить карты распределения повреждений и определить зоны, требующие первоочередного внимания [8].

Перспективным направлением является применение методов машинного обучения для оптимизации стратегий технического обслуживания и ремонта. Как показывают исследования [10], использование алгоритмов машинного обучения в сочетании с системами поддержки принятия решений позволяет достичь значительного сокращения времени проектирования усиления и повышения эффективности капиталовложений.

Заключение

Методы искусственного интеллекта представляют собой эффективное средство для оптимизации армирования и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций. Технология позволяет количественно оценивать остаточный ресурс конструкций, выявлять скрытые деградационные процессы и оптимизировать параметры усиления [2, 4, 6, 7]. Наиболее достоверные результаты достигаются при комплексном применении методов машинного обучения с традиционными неразрушающими методами контроля и при учёте факторов, влияющих на долговечность (состав бетона, условия эксплуатации, временная динамика деградационных процессов) [3, 5, 9].

Таким образом, в результате выполнения работы был обобщён опыт применения методов искусственного интеллекта для оптимизации армирования и прогнозирования долговечности железобетонных конструкций. Установлено, что традиционные эмпирические и аналитические методы обладают ограниченной информативностью в отношении скрытых дефектов и не позволяют получить полную картину распределения повреждений по сечению элемента [1], тогда как применение алгоритмов машинного обучения и их интерпретация дают возможность выявлять зоны деградации на ранних стадиях и количественно оценивать остаточный ресурс

конструкций [7, 8]. Дальнейшее развитие метода связано с совершенствованием метрологического обеспечения, разработкой специализированных нормативных документов и внедрением алгоритмов объяснимого искусственного интеллекта для повышения доверия к результатам прогнозирования [9, 10].

Литература

1. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : Стандартинформ, 2012. – 55 с.
2. Ло Д. Исследование диагностики долговечности бетонных конструкций на основе искусственного интеллекта / Д. Ло, Ф. Ли, Д. Ню // Журнал строительных конструкций. – 2024. – Т. 45. – № 2. – С. 1–13.
3. Го Х. Прогнозирование и интерпретация жизненного цикла железобетонных конструкций в прибрежных и морских условиях: структура ансамблевого обучения / Х. Го, Ю. Дон, Э. Бастидас-Артеага // Структурная безопасность. – 2024.
4. Оценка термомеханического повреждения бетона с использованием ультразвукового импульса и методов акустической эмиссии / Л.Х. Чен [и др.] // Advances in Civil Engineering. – 2025. – Art. 8446241.
5. Amgoth R. Comparative study of corrosion-based service life prediction of reinforced concrete structures using traditional and machine learning approach / R. Amgoth, A.K. Samanta, A. Paral // International Journal of Structural Integrity. – 2024.
6. Performance analysis and optimization of aging railway viaduct RC columns strengthened with ML-enhanced AIDAF framework / Y. Cao [et al.] // AI in Civil Engineering. – 2025. – Vol. 4. – № 1. – DOI: 10.1007/s43503-025-00079-1
7. Guo H. Life-cycle performance prediction and interpretation for coastal and marine RC structures: An ensemble learning framework / H. Guo, Y. Dong, E. Bastidas-Arteaga // ScienceDirect. – 2024.
8. Performance analysis and optimization of aging railway viaduct RC columns strengthened with ML-enhanced AIDAF framework / J. Liu [et al.] // AI in Civil Engineering. – 2025.
9. Ким С.Б. Разработка стратегии сейсмического усиления школьных зданий с использованием модели классификации типов разрушения колонн на основе машинного обучения / С.Б. Ким, И.С. Чхве, Дж.У. Син // Журнал Корейского общества инженеров-сейсмологов. – 2024. – Т. 28. – № 5. – С. 275–283.
10. Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy for profiling thermal damage gradients and monitoring post-fire recovery in concrete / M. Fang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 458. – Art. 139456.

References

1. GOST 31937-2011. Buildings and Structures. Rules for Inspection and Monitoring of Technical Condition. – M. : Standartinform, 2012. – 55 p.
2. Luo D. Research progress on durability diagnosis of concrete structures based on artificial intelligence / D. Luo, F. Li, D. Niu // Journal of Building Structures. – 2024. – Vol. 45. – № 2. – P. 1–13.
3. Guo H., Dong Y., Bastidas-Arteaga E. Life-cycle performance prediction and interpretation for coastal and marine RC structures: An ensemble learning framework // Structural Safety. 2024.
4. Assessment of thermomechanical damage in concrete using ultrasonic pulse and acoustic emission techniques / L.H. Chen [et al.] // Advances in Civil Engineering. 2025. Art. 8446241.
5. Amgoth R. Comparative study of corrosion-based service life prediction of reinforced concrete structures using traditional and machine learning approach / R. Amgoth, A.K. Samanta, A. Paral // International Journal of Structural Integrity. – 2024.
6. Performance analysis and optimization of aging railway viaduct RC columns strengthened with ML-enhanced AIDAF framework / Y. Cao [et al.] // AI in Civil Engineering. – 2025. – Vol. 4. – № 1. DOI: 10.1007/s43503-025-00079-1
7. Guo H. Life-cycle performance prediction and interpretation for coastal and marine RC structures: An ensemble learning framework / H. Guo, Y. Dong, E. Bastidas-Arteaga // ScienceDirect. – 2024.
8. Performance analysis and optimization of aging railway viaduct RC columns strengthened with ML-enhanced AIDAF framework / J. Liu [et al.] // AI in Civil Engineering. – 2025.
9. Kim S.B. Machine Learning-Based Retrofit Scheme Development for Seismically Vulnerable Reinforced Concrete School Buildings / S.B. Kim, I.S. Choi, J.W. Shin // Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea. – 2024. – Vol. 28. – № 5. – P. 275–283.
10. Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy for profiling thermal damage gradients and monitoring post-fire recovery in concrete / M. Fang [et al.] // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 458. Art. 139456.

УДК 691.32

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО БЕТОНА В ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТАХ: МОСТЫ, ТОННЕЛИ, АЭРОДРОМЫ

♦♦♦♦♦

USE OF LOW-CARBON CONCRETE IN INFRASTRUCTURE PROJECTS: BRIDGES, TUNNELS, AND AIRPORTS

Буракова М.М.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
mburakova2004@yandex.ru

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. Воздействие строительной индустрии на окружающую среду, в частности производство цемента, является одним из ключевых факторов глобального изменения климата: на долю цементной и бетонной промышленности приходится около 7–8 % антропогенных выбросов CO_2 [1]. В условиях растущих требований к снижению углеродного следа инфраструктурных объектов возникает необходимость в применении низкоуглеродных бетонных технологий. В статье систематизированы данные отечественных и зарубежных исследований по применению низкоуглеродного бетона в таких инфраструктурных проектах, как мосты, тоннели и аэродромы. На основе анализа практических примеров рассмотрены основные технологии снижения углеродного следа (замена клинкера, углеродная минерализация, геополимерные вяжущие) и их эффективность. Результаты показывают, что применение низкоуглеродных бетонов обеспечивает сокращение выбросов CO_2 на 10–73 % в зависимости от технологии и типа конструкции [4, 5].

Ключевые слова: низкоуглеродный бетон, инфраструктурные проекты, мосты, тоннели, аэродромы, углеродная минерализация, геополимерный бетон, устойчивое строительство.

Burakova M.M.
Student of group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
mburakova2004@yandex.ru

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. The environmental impact of the construction industry, particularly cement production, is a key driver of global climate change, with the cement and concrete industry accounting for approximately 7–8 % of anthropogenic CO_2 emissions [1]. Growing requirements for reducing the carbon footprint of infrastructure projects necessitate the adoption of low-carbon concrete technologies. This article systematizes data from domestic and foreign studies on the application of low-carbon concrete in infrastructure projects such as bridges, tunnels, and airports. Based on the analysis of practical examples, the main technologies for reducing carbon footprint (clinker substitution, carbon mineralization, geopolymer binders) and their effectiveness are considered. The results show that the use of low-carbon concretes provides CO_2 emission reductions of 10–73 % depending on the technology and type of structure [4, 5].

Keywords: low-carbon concrete, infrastructure projects, bridges, tunnels, airports, carbon mineralization, geopolymer concrete, sustainable construction.

Ежегодно в мире при строительстве инфраструктурных объектов расходуются миллионы тонн бетона. Мосты, тоннели и аэродромы относятся к наиболее материалоёмким категориям строительства, что обусловливает значительный углеродный след этих объектов. Производство портландцемента, основного компонента традиционного бетона, сопровождается интенсивными выбросами CO_2 как за счёт сжигания топлива, так и вследствие разложения карбонатов при обжиге клинкера [1]. В этих условиях переход к низкоуглеродным бетонам становится не просто экологической инициативой, а практической необходимостью, определяющей долгосрочную устойчивость транспортной инфраструктуры.

Традиционная методика оценки эффективности материалов в инфраструктурных проектах, как правило, ограничивается анализом прочностных характеристик и начальной стоимости. Однако такой подход не учитывает полный жизненный цикл конструкции и её углеродный след [4]. В условиях необходимости оперативной оценки экологической эффективности больших объёмов бетона возникает потребность в применении комплексных методов анализа, включающих оценку жизненного цикла (LCA) и учёт долговечности материала [4, 5].

Развитие технологий низкоуглеродного бетона открывает новые возможности для снижения воздействия инфраструктуры на климат. Замена части портландцемента дополнительными цементирующими материалами (SCM), такими как гранулированный доменный шлак

(GGBFS), зола-унос, кальцинированная глина, позволяет существенно сократить выбросы CO_2 [1, 4]. Углеродная минерализация, при которой CO_2 связывается в бетоне в виде стабильных карбонатов, обеспечивает дополнительный эффект секвестрации углерода [3, 6]. Геополимерные вяжущие, полностью исключающие портландцемент, демонстрируют потенциал сокращения выбросов до 70–80 % [5].

Целью настоящей работы является обобщение опыта применения низкоуглеродного бетона в инфраструктурных проектах – мостах, тоннелях и аэродромах, а также определение подходов к оценке эффективности таких решений для практического использования.

Физические основы низкоуглеродного бетона

Физической основой снижения углеродного следа бетона служит сокращение содержания клинкера в вяжущем. Клинкер является наиболее углеродоёмким компонентом цемента: на его долю приходится основная часть выбросов при производстве [1]. Систематический обзор LCA-исследований показывает, что известняково-кальцинированная глиняная цементная система (LC3) обеспечивает снижение выбросов на 36–46 % по сравнению с обычным портландцементом, при этом демонстрируя повышенную долговечность [4]. Оптимизированные геополимерные, вяжущие на основе золы-уноса, позволяют достичь сокращения выбросов на 70–73 %, однако их эффективность существенно зависит от углеродного следа активаторов [4, 5].

Для инфраструктурных объектов, подверженных воздействию хлоридов (мосты в прибрежных зонах), применение шлаковых вяжущих обеспечивает не только снижение углеродного следа, но и повышение долговечности. Исследование моста Валияжееккаль-Азхееккаль в Индии показало, что бетон с 70 % заменой портландцемента на GGBFS обеспечил четырёхкратное увеличение срока службы без коррозии по сравнению с конструкциями из обычного бетона, при снижении углеродного следа на 8 % [1]. Если бы весь мост был построен с использованием шлакового бетона, экономия составила бы около 5000 тонн CO_2-эквивалента [1].

Углеродная минерализация представляет собой технологию, при которой CO_2, взятый из промышленных источников, вводится в свежий бетон и связывается в виде карбоната кальция. Эта технология не только обеспечивает секвестрацию углерода, но и улучшает прочностные характеристики бетона, позволяя оптимизировать расход цемента [3, 6]. На аэродромных проектах применение данной технологии уже демонстрирует практические результаты [3].

Мосты

Мостовые конструкции относятся к категории ответственных инженерных сооружений, где наряду с прочностью критическое значение имеет долговечность, особенно в условиях агрессивных сред. Применение низкоуглеродных бетонов в мостостроении позволяет одновременно решать задачи снижения углеродного следа и повышения эксплуатационной надёжности [1, 11].

Практический пример моста Валияжееккаль-Азхееккаль в Керале (Индия) демонстрирует комплексный эффект применения шлаковых вяжущих. Данный мост является самым длинным арочным мостом в Южной Азии (пролёт 1,24 км) и эксплуатируется в морской среде Аравийского моря с высокой влажностью и интенсивными осадками [1]. При строительстве среднего и подходных пролётов использовался бетон с 70 % заменой портландцемента на GGBFS, тогда как другие пролёты были выполнены из бетона на основе 100 % портландцемента. Испытания показали, что сопротивление проникновению хлоридов у шлакового бетона значительно выше, а расчётный срок службы без коррозии в четыре раза превышает аналогичный показатель для конструкций из обычного бетона [1]. Экономия углеродного следа при строительстве пролётов со шлаковым бетоном составила около 800 тонн CO_2-эквивалента [1].

Современные исследования также рассматривают применение фиброармированного геополимерного бетона на основе переработанных материалов (FRGRC) для сейсмостойких мостовых опор. Комплексная оценка, включающая сейсмическую уязвимость, углеродные выбросы и экономические потери, показывает, что такие решения обеспечивают снижение углеродного следа при сохранении или повышении сейсмической устойчивости конструкции [11].

Тоннели

Тоннельные обделки относятся к наиболее материалоёмким элементам подземных сооружений, что делает их ключевым объектом для внедрения низкоуглеродных решений. Бетон для тюбинговой обделки должен обладать высокой прочностью, водонепроницаемостью и долговечностью, что традиционно ограничивало возможности замены цемента. Однако современные исследования демонстрируют успешные примеры применения геополимерных и бесцементных вяжущих в тоннелестроении [2, 5].

В рамках проекта London Power Tunnels Phase 2 (Великобритания) был успешно апробирован бесцементный геополимерный бетон Earth Friendly Concrete (EFC) для тюбинговой обделки. Испытания включали проверку удобоукладываемости, прочности на сжатие и растяжение при изгибе, теплоты гидратации, огнестойкости и долговечности. Все испытания были

пройдены успешно, что подтвердило возможность применения такого вяжущего в ответственных подземных конструкциях при условии соответствия требованиям BSI Flex 350 и Eurocode 2 [2].

Датский исследовательский проект по применению геополимерного бетона в тюбинговой обделке будущих тоннелей показывает потенциал сокращения выбросов CO_2 на 70–80 % по сравнению со стандартным бетоном класса C50/60. Предварительные результаты подтверждают эквивалентные или превосходные характеристики по прочности на сжатие, сопротивлению хлоридной агрессии и химической стойкости [5]. Однако широкое внедрение геополимеров в тоннелестроении сдерживается отсутствием стандартизированных расчётных норм и устоявшихся цепочек поставок [5].

Проект Kensico-Eastview Connection (США) демонстрирует системный подход к снижению углеродного следа тоннелей. В рамках проекта были заданы чёткие цели по сокращению **воплощённого углерода** с этапа планирования, включая спецификацию низкоуглеродного бетона, использование региональных материалов, применение SCM и требование Environmental Product Declarations (EPD). Более 20 000 м³ извлеченного материала были повторно использованы на площадке, что дополнительно снизило транспортные выбросы [7].

Применение самоуплотняющегося низкоуглеродного бетона (Low-Carbon SCC) в тоннеле **Тавараяма – Тойота № 1** (Япония) позволило не только снизить углеродный след, но и повысить производительность: количество рабочих было сокращено вдвое, время бетонирования – на 40 %, при обеспечении высокого качества обделки без поверхностных раковин и незаполненных зон [8].

Аэродромы

Аэродромные покрытия подвергаются экстремальным нагрузкам от воздушных судов, что предъявляет повышенные требования к прочности и долговечности бетона. Применение низкоуглеродных технологий в этой сфере сопряжено с дополнительными сложностями, однако практические примеры последних лет демонстрируют успешное внедрение таких решений [3, 6, 9, 10].

Крупнейшим проектом в этой области является строительство третьей взлётно-посадочной полосы (ВПП) в аэропорту имени Короля Салмана в Эр-Рияде (Саудовская Аравия). Компания FCC Construcción совместно с CarbonCure Technologies реализует технологию углеродной минерализации, при которой захваченный CO_2 связывается в бетоне в процессе производства. Проект предусматривает секвестрацию около 6800 тонн CO_2-эквивалента и снижение воплощенного углерода на 5–10 % [3]. Новая ВПП длиной 4 905 м с тремя параллельными рулёжными дорожками и двенадцатью скоростными сходами требует около 400000 м³ бетона, что делает масштаб применения технологии значительным [3].

В аэропорту Париж-Шарль-де-Голль (Франция) компания AGILIS успешно применила углерод-депонирующий дополнительный цементирующий материал Paebbl Rebond 300 в составе скользящей опалубки для бетонных ограждений и разделителей ВПП. Испытания, проведённые NGE Concrete Research Department и ATCM, показали снижение воплощенного углерода на 28 % по сравнению с традиционной рецептурой при сохранении эквивалентных, а в некоторых аспектах превосходных характеристик [6]. Данное решение представляет собой первый успешный пример применения углерод-депонирующего SCM в скользящей опалубке – смеси с низкой удобоукладываемостью, что открывает путь для широкого внедрения технологии в инфраструктурных проектах [6].

Аэропорт Гатвик (Великобритания) в сотрудничестве с Heidelberg Materials и Ramboll UK провёл испытания бетонных смесей с 20 % заменой цемента на GGBFS на действующей лётной зоне. Предварительные результаты показывают потенциальное снижение выбросов более чем на 10 % (около 140 тонн CO_2-эквивалента) при условии успешного завершения мониторинга. В случае полного внедрения данное решение внесёт вклад в реализацию стратегии устойчивого строительства аэропорта [10].

Оценка эффективности и практические аспекты

Для количественной оценки эффективности низкоуглеродных бетонов в инфраструктурных проектах применяется методология оценки жизненного цикла (LCA). Систематический обзор LCA-исследований показывает, что для смешанных цементов доминирующим параметром является содержание клинкера: снижение клинкерной составляющей на 10 % приводит к изменению GWP на 8–10 % [4]. Для геополимерных вяжущих наибольшее влияние оказывает углеродный след активаторов, который может обусловливать 48–105 % вариации GWP [4]. Декарбонизация электросетей также вносит значительный вклад: в зависимости от региона и технологии этот фактор может вызывать вариацию GWP от 15 до 41 % [4].

Одним из ключевых аспектов практического внедрения низкоуглеродных бетонов является их соответствие нормативным требованиям. Для геополимерных вяжущих, не содержащих

портландцемент, отсутствие стандартизированных расчётных норм. Проект London Power Tunnels продемонстрировал, что преодоление этих барьеров возможно путём испытаний и тесное взаимодействие с заказчиком и проектным бюро [2].

Влажность и условия твердения также влияют на эффективность низкоуглеродных вяжущих. Для шлаковых бетонов рекомендуется продлённое влажностное выдерживание, которое может быть обеспечено путём включения соответствующих требований в тендерную документацию [1]. Это позволяет достичь проектных характеристик долговечности и реализовать преимущества шлаковых вяжущих в полной мере.

Метрологически обоснованная калибровка оборудования и учёт условий измерений при оценке характеристик низкоуглеродных бетонов позволяют снизить разброс результатов и повысить воспроизводимость данных, что критически важно для принятия обоснованных решений о применении новых материалов в инфраструктурных проектах [4].

Заключение

Низкоуглеродный бетон представляет собой эффективное средство снижения углеродного следа инфраструктурных проектов – мостов, тоннелей и аэродромов. Технологии замены клинкера дополнительными цементирующими материалами, углеродной минерализации и геополимерных вяжущих позволяют достичь сокращения выбросов CO_2 на 10–73 % в зависимости от типа конструкции и применяемой технологии [1–6]. Наиболее значительные результаты достигаются при комплексном применении нескольких подходов, учитывающих как производственные характеристики материала, так и его долговечность в течение жизненного цикла [4, 5].

Практические примеры, рассмотренные в статье, демонстрируют, что низкоуглеродные бетоны успешно применяются в ответственных инфраструктурных конструкциях – от морских мостов до аэродромных покрытий и тоннельных обделок. Ключевыми факторами успешного внедрения являются: метрологически обоснованная оценка характеристик материалов, проведение всесторонних испытаний в реальных условиях, соответствие нормативным требованиям и тесное взаимодействие всех участников проекта [2, 4, 7].

Дальнейшее развитие направления связано с совершенствованием нормативной базы для геополимерных вяжущих, расширением базы данных по долгосрочной долговечности низкоуглеродных бетонов в различных условиях эксплуатации и внедрением стандартизированных методик оценки жизненного цикла [4, 5].

Литература / References:

1. Effect of slag in concrete to enhance service life and reduce carbon footprint of a coastal highway bridge / P.K. Praseeda [et al.] // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 489. – Art. 142313.
2. Experiences of trialing and testing of cement-free concrete for underground applications / S. Shea [et al.] // Proceedings of the Earth Friendly Concrete Initiative, National Grid London Power Tunnels Phase 2. Taylor & Francis. – 2026.
3. FCC Construcción signs an agreement to reduce the carbon footprint of the 3rd Runway project at King Salman International Airport (Riyadh) // FCC Construcción. – 2026.
4. CO_2 Footprints of Next-Gen Sustainable Concretes: LCA Synthesis and Practical Implications // Zenodo. – 2025.
5. Edvardsen C. Cement-free concrete for the next generation of bored tunnels – practical pathway to achieving 70 % CO_2 reduction in tunnelling // Taylor & Francis. – 2026.
6. AGILIS and Paebbl Cut Concrete Infrastructure Carbon Footprint By 28 % // Carbon Herald. – 2026.
7. Zhang K., Tsang E., Waki T. Embedding sustainability in tunnel design: A holistic approach from planning for embodied carbon reduction – Kensico-Eastview Connection // Taylor & Francis. – 2026.
8. Productivity Improvement of Tunnel Lining Using Low-Carbon Self-Compacting Concrete // J-STAGE. – 2025.
9. Indianapolis International Airport Runway Reconstruction Project Earns ACPA Awards // Kimley-Horn. – 2026.
10. Careys. Gatwick Airport Project Update // Careys. – 2026.
11. Seismic resilience and carbon emission assessment for bridges constructed with fiber-reinforced geopolymer recycled concrete // Construction and Building Materials. – 2026. – Vol. 466.

УДК 69.059.62

ДЕМОНТАЖ ИЛИ СНОС: ТЕХНОЛОГИИ РАЗБОРКИ ЗДАНИЙ С МАКСИМАЛЬНЫМ ВОЗВРАТОМ БЕТОНА В ОБОРОТ

♦♦♦♦♦

DEMOLITION OR DECONSTRUCTION: TECHNOLOGIES FOR BUILDING DISMANTLING WITH MAXIMUM CONCRETE RECOVERY

Буракова М.М.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
mburakova2004@yandex.ru

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. Переход строительной отрасли к принципам циркулярной экономики требует пересмотра традиционных подходов к сносу зданий. Ежегодно возрастающие объёмы строительных отходов и истощение природных ресурсов обусловливают необходимость разработки технологий, обеспечивающих максимальный возврат бетона в оборот. В статье систематизированы данные отечественных и зарубежных исследований по применению селективного демонтажа как альтернативы традиционному сносу. Рассмотрены методы оценки пригодности бетонных элементов к повторному использованию, включая оценку остаточного срока службы на основе карбонизации. Предложена классификация технологий разборки по степени извлечения материала и представлены практические аспекты организации демонтажных работ. Результаты показывают, что селективный демонтаж обеспечивает существенное повышение качества вторичного бетона и сокращение углеродного следа строительства.

Ключевые слова: демонтаж, снос, селективная разборка, рециклинг бетона, повторное использование, циркулярная экономика, карбонизация, оценка срока службы, строительные отходы.

Burakova M.M.
Student of group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
mburakova2004@yandex.ru

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. The transition of the construction industry to circular economy principles requires a revision of traditional approaches to building demolition. The annually increasing volumes of construction waste and depletion of natural resources necessitate the development of technologies ensuring maximum concrete recovery. The article systematises data from domestic and foreign studies on the application of selective deconstruction as an alternative to conventional demolition. Methods for assessing the suitability of concrete elements for reuse are considered, including residual service life assessment based on carbonation. A classification of dismantling technologies by material recovery degree is proposed, and practical aspects of organising deconstruction works are presented. Results show that selective deconstruction provides a significant improvement in the quality of secondary concrete and reduces the carbon footprint of construction.

Keywords: deconstruction, demolition, selective dismantling, concrete recycling, reuse, circular economy, carbonation, service life assessment, construction waste.

Введение

Строительная отрасль является одним из крупнейших потребителей природных ресурсов и одновременно источником значительных объёмов отходов. Ежегодно в мире образуется более 10 млрд тонн строительных и демонтажных отходов, значительную долю которых составляет бетон [1]. Традиционная практика сноса зданий, основанная на применении тяжёлой техники и механическом разрушении конструкций, приводит к образованию смешанных фракций отходов, качество которых не позволяет использовать их в несущих конструкциях. Такие материалы, как правило, находят применение в качестве подсыпки под дорожное покрытие или заполнителя для неконструктивных элементов, что представляет собой даунциклинг – понижение ценности материала [1].

Концепция циркулярной экономики предполагает сохранение ценности строительных ресурсов на протяжении их жизненного цикла. В отношении бетона это означает приоритет повторного использования целых элементов и конструкций над их переработкой в заполнитель, и переработку – над захоронением [2]. Для реализации этой иерархии требуется принципиально иной подход к разборке зданий, основанный на селективном демонтаже.

Целью настоящей работы является обобщение опыта применения технологий селективного демонтажа для максимального возврата бетона в оборот, а также определение подходов к оценке пригодности бетонных элементов к повторному использованию.

От сноса к демонтажу: смена парадигмы

Традиционный снос зданий характеризуется высокой скоростью выполнения работ и относительно низкой стоимостью. Однако эти преимущества достигаются за счёт потери значительной части материальной ценности конструкций. При механическом разрушении железобетона происходит перемешивание бетона и арматуры, загрязнение материалов гипсом, древесиной и другими примесями, что исключает их повторное использование в ответственных конструкциях [3].

Селективный демонтаж (selective deconstruction) представляет собой постадийную разборку здания с разделением материалов по фракциям непосредственно на строительной площадке. Исследования показывают, что материалы, полученные в результате селективного демонтажа, обладают значительно более высокой степенью чистоты по сравнению с продуктами традиционного сноса. Экономические оценки свидетельствуют, что селективный демонтаж может быть сопоставим по стоимости или даже дешевле традиционного сноса при условии тщательного планирования и наличии рынка сбыта для вторичных материалов [3].

Концепция проектирования для демонтажа (Design for Deconstruction, DfD) развивает эту идею на стадии проектирования здания. Она предполагает использование разъёмных соединений, модульных элементов и таких конструктивных решений, которые облегчают последующую разборку и повторное использование компонентов. Таxonomия DfD, разработанная на основе структурной типологии строительных элементов, охватывает бетонные, стальные, деревянные и каменные конструкции [4].

Технологии селективного демонтажа

Выбор конкретных технологий разборки зависит от конструктивной схемы здания, материала элементов, степени армирования и требований по минимизации воздействия на окружающую среду. В таблице 1 представлена классификация основных технологий демонтажа бетонных конструкций.

Таблица 1 – Технологии демонтажа бетонных конструкций и их характеристики

Технология	Применение	Точность	Уровень вибрации	Возможность повторного использования
Алмазная резка	Разделение крупных элементов, проёмы	Высокая	Низкий	Высокая
Гидравлические ножницы	Разрушение железобетона, отделение арматуры	Средняя	Средний	Средняя
Гидроклиновые раскалыватели	Разделение массивных элементов, фундаментов	Высокая	Очень низкий	Высокая
Отбойные молотки	Локальное разрушение	Низкая	Высокий	Низкая

Алмазная резка позволяет выполнять контролируемое разделение бетонных элементов с минимальным нарушением структуры материала. Эта технология особенно эффективна при необходимости извлечения целых фрагментов стен, плит перекрытий или лестничных маршей для последующего повторного использования [5]. Гидравлические ножницы обеспечивают сочетание разрушения бетона и отделения арматуры, что упрощает сортировку материалов [6]. Гидроклиновые раскалыватели генерируют высокие разделяющие усилия в предварительно пробуренных отверстиях, позволяя выполнять малошумное и низковибрационное разделение массивных элементов [5].

Современные исследования показывают, что сочетание различных технологий в рамках единого демонтажного проекта позволяет оптимизировать баланс между скоростью работ, точностью разделения и качеством получаемых материалов. Многокритериальный анализ демонтажных стратегий, проведённый для четырёхэтажного университетского здания, выявил, что селективное удаление лестничных маршей и стеновых панелей обеспечивает оптимальное соотношение материальной эффективности и экологической безопасности [7].

Оценка пригодности бетона к повторному использованию

Повторное использование бетонных элементов требует надёжной оценки их остаточного срока службы. Традиционные подходы, основанные на нормативных требованиях для новых конструкций или измерении глубины карбонизации, недостаточны для обеспечения работоспособности элементов в течение дополнительных 50–100 лет [8]. В связи с этим разрабатываются вероятностные модели оценки, учитывающие изменение условий эксплуатации после демонтажа.

Исследование, выполненное на основе метода Монте-Карло, показало, что повторно используемые бетонные элементы могут достигать срока службы, сопоставимого с новыми конструкциями, при условии применения перформанс-ориентированного подхода и своевременных ремонтных вмешательств. Модель учитывает такие параметры, как продолжительность хранения элементов до повторного использования, изменение класса условий эксплуатации после демонтажа, модифицированные скорости карбонизации в течение второго срока службы [8].

Цифровые рабочие процессы позволяют автоматизировать оценку пригодности элементов к повторному использованию. Разработанный цифровой инструмент связывает данные цифровой модели здания с экологическими характеристиками строительных продуктов и методами расчёта поглощения CO_2 бетоном при карбонизации [9]. Такой подход даёт возможность принимать решения о жизненном цикле элементов на ранних стадиях проектирования.

Глубина зоны повреждения и качество вторичного бетона

При механическом разрушении бетона образуется зона нарушенной структуры, глубина которой зависит от применяемого метода. Исследования показывают, что алмазная резка минимизирует повреждения, тогда как ударные методы приводят к образованию микротрещин на глубину до 20–30 мм [5]. Это имеет принципиальное значение при оценке возможности повторного использования извлечённых элементов в несущих конструкциях.

Для переработки бетона в заполнитель качество исходного материала также имеет значение. Исследование RECOMPOSE, финансируемое ЕС, показало, что бетон с заполнителем, полностью состоящим из переработанного бетона (100 % RAC), может успешно применяться в сталебетонных композитных перекрытиях. Были выявлены особенности поведения таких конструкций, включая релаксацию нагрузки в вертикальных стойках, что потребовало разработки модифицированной модели проектирования [10].

Практические аспекты организации демонтажа

Успешная реализация проектов селективного демонтажа требует решения комплекса организационных и методических вопросов. Прежде всего, необходим преддемонтажный аудит, включающий инвентаризацию материалов, оценку их состояния и определение потенциальных путей использования. BIM-поддержка такого аудита позволяет систематизировать данные о количестве и расположении материалов, подлежащих извлечению [11].

Калибровка оборудования и учёт условий измерений являются важными аспектами контроля качества. Для оценки остаточного ресурса конструкций целесообразно применять неразрушающие методы, включая ультразвуковой контроль и измерение глубины карбонизации. Комплексный подход, сочетающий различные методы диагностики, обеспечивает более достоверную оценку состояния материала [8].

Сортировка материалов на строительной площадке позволяет достичь высокой степени чистоты фракций. Исследования показывают, что предварительная сортировка является экономически обоснованной при наличии соответствующих требований и инфраструктуры. В Нидерландах, например, требования к селективному демонтажу способствуют тому, что сортировка материалов начинается уже на стадии разборки здания [12].

Заключение

Селективный демонтаж представляет собой эффективную альтернативу традиционному сносу зданий, обеспечивающую максимальный возврат бетона в оборот и сохранение материальной ценности конструкций. Технологии алмазной резки, гидравлических ножниц и гидроклиновых раскалывателей позволяют извлекать бетонные элементы с минимальными повреждениями, пригодные для повторного использования или высококачественной переработки.

Наиболее достоверная оценка пригодности бетона к повторному использованию достигается при применении перформанс-ориентированных вероятностных моделей, учитывающих изменение условий эксплуатации после демонтажа, и комплексном использовании неразрушающих методов контроля [8]. Цифровые инструменты, связывающие данные о материальных потоках с экологическими характеристиками, открывают возможности для оптимизации демонтажных стратегий на ранних стадиях проектирования [9].

Дальнейшее развитие направления связано с совершенствованием нормативной базы селективного демонтажа, разработкой стандартизированных процедур оценки остаточного ресурса бетонных элементов и внедрением технологий автоматизированной сортировки материалов.

Литература / References

1. Darda GmbH. Deconstruction Remediation – Selective Demolition. – 2025.
2. Taxonomy of design for deconstruction options to enable circular economy in buildings // Eurocodes. – 2024.
3. Umweltbundesamt. Selektiver Rückbau von Gebäuden. – 2024.

4. Taxonomy of design for deconstruction options to enable circular economy in buildings // Eurocodes. – 2024.
5. Darda GmbH. Residential Building Demolition Process & Methods. – 2026.
6. Darda GmbH. Deconstruction Remediation – Selective Demolition. – 2025.
7. Optimising sustainable deconstruction strategies for concrete structures: a multi-criteria decision-making framework approach // ScienceDirect. – 2025.
8. From durability to circularity: ensuring service life and enabling reuse of concrete in circular construction / A. Dervishaj [et al.] // Materials and Structures. – 2026. – Vol. 59. – № 1. – P. 1–33.
9. Dervishaj A. Digital workflow to support the reuse of precast concrete and estimate the climate benefit / A. Dervishaj, K. Gudmundsson, T. Malmqvist // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – Vol. 1402. – 012026 p.
10. Fu Q. RECOMPOSE: Resource Efficient Steel – Recycled Aggregate Concrete Composite Floor Systems / Q. Fu, M. Schäfer // CORDIS. – 2025.
11. Systematic Review of Engineering Procedures to Facilitate Decision-Making for Concrete Element Reuse // Journal of Architectural Engineering. – 2025. – Vol. 31. – № 3.
12. Selective demolition case study: Eikenstein, Netherlands // ICEBERG Project. – 2023.

УДК 711.4

БИОСФЕРНО-СОВМЕСТИМОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО КАК НОВАЯ ПАРАДИГМА АРХИТЕКТУРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

♦♦♦♦♦

BIOSPHERE-COMPATIBLE CONSTRUCTION AS A NEW PARADIGM OF ARCHITECTURAL DESIGN

Выпринцева Виолетта Денисовна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
vvyprintseva@yandex.ru

Гулякин Дмитрий Владимирович
доктор педагогических наук,
профессор,
Кубанский государственный технологический университет
dvggti@yandex.ru

Аннотация. Данная статья обосновывает биосферно-совместимое строительство как новую парадигму архитектурного проектирования, приходящую на смену антропоцентрической модели. Рассматриваются теоретические основания концепции, система принципов (симбиоза, развития человеческого потенциала, самоподдерживающегося развития и комплексной безопасности), методологический аппарат количественной оценки биосферной совместимости и практические направления реализации – биогенные материалы, зелёные кровли, «живые» фасады, здания как экосистемы. Автором выявлены основные вызовы внедрения и показаны перспективы формирования устойчивого городского пространства на принципах коэволюции с биосферой.

Ключевые слова: биосферно-совместимое строительство, парадигма архитектурного проектирования, устойчивое развитие, развитие человеческого потенциала, самоподдерживающееся развитие, комплексная безопасность.

Vyprintseva Violetta Denisovna
Student,
Kuban State Technological University
vvyprintseva@yandex.ru

Gulyakin Dmitry Vladimirovich
Doctor of Pedagogical Sciences,
Professor,
Kuban State Technological University
dvggti@yandex.ru

Annotation. This article substantiates biosphere-compatible construction as a new paradigm of architectural design, replacing the anthropocentric model. The theoretical foundations of the concept, the system of principles (symbiosis, human potential development, self-sustaining development, and comprehensive safety), the methodological framework for quantitatively assessing biosphere compatibility, and practical areas of implementation – biogenic materials, green roofs, «living» facades, and buildings as ecosystems – are examined. The author identifies the main challenges of implementation and shows the prospects for forming a sustainable urban space based on the principles of co-evolution with the biosphere.

Keywords: biosphere-compatible construction, architectural design paradigm, sustainable development, human development, self-sustaining development, comprehensive safety.

Биосферно-совместимое строительство представляет собой научное направление, интегрирующее положения системной экологии, теории самоорганизации, социально-экономического прогнозирования и архитектурного формообразования. Методологической базой выступает общая теория биосферной совместимости, в рамках которой постулируется фундаментальный принцип единения поселения и окружающей природы, единство сознания, так как человек является частью природы и без неё не может существовать [1].

Антропоцентрическая установка о человеке как венце природы заменяется биосферо-центрической, утверждающей имманентную ценность всех компонентов биосферы. Способность человека к преобразованию среды не наделяет его правом на её деградацию, поскольку фундаментальные жизнеобеспечивающие ресурсы – вода, воздух, почва, биоценозы – не воспроизводятся техносферой и не могут быть созданы искусственно. Прогрессивное развитие человеческого потенциала на урбанизированных территориях должно быть сопряжено с механизмами воспроизводства природной среды. Следовательно, биосферная совместимость выступает не как дополнительный экологический фильтр для проектных решений, но как системообразующий императив, определяющий онтологический статус архитектурного объекта в иерархии биосферных процессов.

Биосферная совместимость как интегральная характеристика урбанизированной территории включает взаимосвязанные подсистемы.

Экологическая подсистема отражает способность территории сохранять и восстанавливать естественные экосистемные функции, обеспечивать качество атмосферного воздуха, водных объектов и почвенного покрова в пределах санитарно-гигиенических нормативов.

Социальная подсистема аккумулирует условия для реализации человеческого потенциала – физического, интеллектуального, духовного – через доступность рекреационных ресурсов, социальной инфраструктуры, культурных объектов и безопасность среды жизнедеятельности.

Экономическая подсистема предполагает минимизацию затрат природных ресурсов на всех стадиях жизненного цикла объектов недвижимости, внедрение циркулярных моделей ресурсопотребления и формирование локальной экономики замкнутого цикла.

Указанные подсистемы находятся в отношении нелинейной взаимозависимости, что требует применения системного подхода к их интегральной оценке. Комплексная оценка проектных решений для биосферно-совместимого строительства основывается на системе не только экономических, но и экологических и социальных факторов, что соответствует принципам устойчивого развития.

В рамках рассматриваемой парадигмы город перестаёт быть автономной техносферной структурой, противостоящей природе, и концептуализируется как элемент биогеоценоза, выполняющий наряду с рекреационной и производственной функцию связи с природой. Данная функция реализуется посредством механизма, представляющего собой перманентный переход качественных и количественных показателей окружающей среды в городе к естественному состоянию биосферы. Экологический механизм градостроительной деятельности не сводится к пассивной компенсации ущерба, но предполагает активное восстановление и усиление природных процессов в границах селитебных зон. Такой подход принципиально отличается от концепции устойчивого развития в её традиционной трактовке, где акцент делается на минимизацию негативного воздействия. В парадигме биосферной совместимости целевой установкой становится достижение положительного экологического баланса, при котором город выступает не как потребитель биосферных ресурсов, а как их продуцент [2].

На основе теоретических разработок могут быть выделены четыре основополагающих принципа, образующих каркас новой парадигмы. *Принцип симбиоза* градостроительных систем с биосферой предписывает проектирование архитектурных объектов и их совокупностей не как обособленных форм, а как структур, функционально интегрированных в экосистемные связи. Симбиоз предполагает взаимовыгодное сосуществование городских элементов и природных компонентов, при котором антропогенные системы не только не нарушают биотический круговорот, но и способствуют его интенсификации. Принцип симбиоза также предполагает мягкое встраивание архитектурных объектов в природный ландшафт, минимизацию нарушения рельефа и гидрологического режима, а также сохранение естественных путей миграции животных.

Принцип развития человеческого потенциала утверждает, что город рассматривается как инструмент прогрессивного развития человека – не только в биологическом, но и в когнитивном, социальном и духовном аспектах. Архитектурная среда должна стимулировать физическую активность, коммуникацию, творческое самовыражение и познавательную деятельность, а качество городской среды включает психоэмоциональную составляющую, связанную с возможностью непосредственного контакта с природой.

Принцип самоподдерживающегося развития предполагает, что биосферосовместимый город должен обладать свойством автономности в части ресурсного обеспечения, что достигается за счёт декарбонизации энергоснабжения, перехода к возобновляемым источникам, внедрения систем рекуперации и повторного использования материалов. Архитектурные объекты проектируются с учётом их жизненного цикла, включая этапы строительства, эксплуатации, реконструкции и утилизации, причём на каждом этапе минимизируются отходы и выбросы. Методологической основой служит концепция экономики замкнутого цикла, в которой отходы производства и потребления рассматриваются не как проблема, а как ресурс для новых продуктовых цепочек.

Принцип комплексной безопасности трактует безопасность как способность системы сохранять устойчивость при внешних возмущениях и восстанавливаться после них. Это предполагает не только конструктивную надёжность зданий и сооружений, но и экологическую, социальную и психологическую безопасность.

Оценка биосферной совместимости проектных решений проводится на иерархических уровнях градостроительного зонирования, причём ключевым признаётся микротерриториальный уровень – кварталы, микрорайоны, жилые районы, поскольку именно здесь формируется повседневная среда обитания человека. В рамках предложенной методологии сравнение вариантов проектов планировки осуществляется по четырём блокам индикаторов: экологическая безопасность жилых территорий; пространственно-территориальные ресурсы; структурно-планировочная и архитектурная организация территории; обеспеченность городскими функциями. По каждому блоку определён необходимый и достаточный состав показателей, рассчитываемых на основе проектных решений. Численная оценка проектных решений отражает соци-

альное содержание проектов планировки с точки зрения предоставления условий для жизнедеятельности и развития человека, а также их экологический императив. Для количественного сопоставления различных вариантов градостроительной организации предложен интегральный показатель биосферной совместимости урбанизированных территорий, позволяющий оценивать степень развития городских территорий с позиции сохранения биосферы в городских экосистемах при выполнении городом основных функций. Разработаны методика прогнозирования динамики изменения показателей биосферной совместимости и алгоритм расчёта обобщённых критериев. Предложена математическая модель для описания сбалансированного состояния урбанизированных территорий как открытых динамических структур с выбором определяющих параметров для управления [3].

Для анализа эволюции биосферных показателей предложен подход к моделированию динамики изменения состояния урбанизированных территорий на принципах биосферной совместимости и самоорганизации. Построена концептуальная модель биосферосовместимых урбанизированных территорий в виде многокомпонентной природно-социотехнической структуры, в которой параметры состояния каждого компонента взаимосвязаны и подчиняются нелинейным зависимостям. Использование данного аппарата позволяет прогнозировать не только текущую экологическую ситуацию, но и сценарии её изменения при реализации новых проектов, что важно для управления устойчивым развитием городов и поселений. Моделирование показывает, что традиционные градостроительные решения, не учитывающие биосферные ограничения, приводят к необратимым изменениям экосистемных функций территории, тогда как проекты, основанные на принципах биосферной совместимости, демонстрируют положительную динамику экологических показателей в долгосрочной перспективе [4].

Одним из приоритетных направлений практической реализации является переход от использования невозобновляемых материалов геосферы к возобновляемым биогенным материалам. К числу таких материалов относятся целлюлозосодержащие композиты, лигноцеллюлозные системы, глинистые грунты и инновационные продукты – мицелиевые композиты, биопластики, биоугли. Преимущества биогенных материалов включают низкий углеродный след, способность к связыванию углекислого газа в процессе роста биомассы, возобновляемость, биоразлагаемость и благоприятный микроклиматический режим помещений за счёт сорбционно-десорбционной способности. Использование биогенных материалов в строительстве позволяет снизить эмиссию парниковых газов на этапе производства и утилизации на 50–70 процентов по сравнению с традиционными материалами. Всё большее распространение получают биорецептивные поверхности – фасадные элементы, способные поддерживать спонтанную колонизацию микроорганизмов, мхов, лишайников и высших растений. К числу таких систем относятся биорецептивные фасадные панели с микрорельефом и пористой структурой, кассетные системы зелёных кровель и вертикальных садов, а также живые фасады с интегрированными биофильтрами для очистки воздуха [5].

Экспериментальные исследования подтверждают, что зелёные стены и кровли снижают концентрацию мелкодисперсных частиц PM2,5 и PM10 на 15–20 процентов, уменьшают эффект городского теплового острова и способствуют секвестрации углерода. Зелёные кровли на общественных зданиях рассматриваются как один из путей реализации концепции биосферосовместимых городов, поскольку они способствуют сохранению и восполнению истощённой части природы, которая была использована под строительные площадки. Технологии зелёных кровель и зелёных стен минимизируют эффект городского теплового острова, что повышает тепловой комфорт и способствует снижению энергопотребления зданий. Наиболее радикальным воплощением биосферной совместимости является концепция зданий как экосистем, в рамках которой архитектурный объект перестаёт быть статичной оболочкой и становится активным элементом биогеоценоза, предоставляющим экосистемные услуги. В рамках данного подхода внешние оболочки зданий проектируются как социально-экологическая инфраструктура, сочетающая смягчение последствий изменения климата с адаптацией и поддержкой биологического разнообразия [6].

Массовое внедрение биосферно-совместимых технологий сдерживается рядом факторов. Действующие строительные нормы и правила преимущественно ориентированы на традиционные материалы и конструктивные системы, а критерии зелёного строительства не всегда отражают специфику биогенных и циркулярных решений [7].

Существующая система сертификации и допуска строительных материалов не учитывает долгосрочные экологические эффекты, что затрудняет появление инновационных продуктов на рынке. Первоначальная стоимость биогенных материалов и энергоэффективных систем часто превышает стоимость традиционных решений, что делает их экономически менее привлекательными в краткосрочной перспективе. Однако расчёт полного жизненного цикла показывает, что эксплуатационные затраты биосферосовместимых зданий могут быть на 20–40

процентов ниже за счёт энергосбережения, снижения расходов на водоснабжение и водоотведение, уменьшения затрат на утилизацию отходов. Для стимулирования перехода к биосферносовместимому строительству требуются экономические механизмы – налоговые льготы, субсидии, системы углеродного ценообразования и зелёное кредитование.

Кадровые и образовательные аспекты также представляют собой существенный вызов. Биосферно-совместимое строительство требует междисциплинарной подготовки специалистов, владеющих основами экологии, биологии, социологии, экономики и инженерного моделирования. Существует необходимость включения концепции биосферной совместимости в учебные планы архитектурно-строительных специальностей, однако её реализация сталкивается с дефицитом учебно-методических материалов и квалифицированных преподавателей, способных интегрировать экологические знания в архитектурное и инженерное образование. Преодоление этих барьеров требует системной работы на уровне государственной политики, профессионального сообщества и образовательных институтов.

Литература

1. Инновационные технологии в строительстве городов. Биосферная совместимость и человеческий потенциал : учеб. пособие / В.А. Ильичев [и др.]. – М. : Издательство АСВ, 2019. – 208 с.
2. Ильичев В.А. Биосферная совместимость природы и человека – путь к системному решению глобальных проблем // Стратегические приоритеты. – 2014. – № 1(1). – С. 42–58.
3. Ильичев В.А. Методика прогнозирования показателей биосферосовместимости урбанизированных территорий / В.А. Ильичев, В.И. Колчунов, В.А. Гордон // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2010. – № 2. – С. 52–57.
4. Прядко И.П. Биосферные и социальные процессы в аспекте стратегического дизайна городской среды // Урбанистика. – 2019. – № 1. – С. 88–101.
5. Страшнов С.В. Биосферная совместимость: человек, регион, технологии / С.В. Страшнов, П.В. Шуткевич, В.В. Качанова // Юго-Западный государственный университет. – 2023. – С. 47–58.
6. Пилипенко О.В. Результаты численных исследований доступности общественных зданий и сооружений маломобильным группам населения (на примере Орловской области) / О.В. Пилипенко, Е.В. Брума, Е.А. Скобелева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – № 4. – С. 37–44.
7. Швидковский Д.О. Смысл архитектуры // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2025. – № 4(52). – С. 2–5.

References

1. Ilyichev V.A. Innovative Technologies in Urban Construction. Biospheric Compatibility and Human Potential : textbook. – M. : ASV Publishing House, 2019. – 208 p.
2. Ilyichev V.A. Biospheric Compatibility of Nature and Man – the Path to a Systemic Solution to Global Problems // Strategic Priorities. – 2014. – № 1(1). – P. 42–58.
3. Ilyichev V.A. Methodology for Predicting Indicators of Biospherically Compatible Urbanized Areas / V.A. Ilyichev, V.I. Kolchunov, V.A. Gordon // Seismic-Resistant Construction. Safety of Structures. – 2010. – № 2. – P. 52–57.
4. Pryadko I.P. Biospheric and social processes in the aspect of strategic design of the urban environment // Urbanistics. – 2019. – № 1. – P. 88–101.
5. Strashnov S.V. Biospheric compatibility: human, region, technologies / S.V. Strashnov, P.V. Shutkevich, V.V. Kachanova // Southwest State University. – 2023. – P. 47–58.
6. Pilipenko O.V. Results of numerical studies of the accessibility of public buildings and structures for people with limited mobility (using the Oryol Region as an example) / O.V. Pilipenko, E.V. Bruma, E.A. Skobeleva // Izvestiya of the Southwestern State University. Series: Engineering and Technology. – 2014. – № 4. – P. 37–44.
7. Shvidkovsky D.O. The Meaning of Architecture // Biospheric Compatibility: Man, Region, Technologies. – 2025. – № 4(52). – P. 2–5.

УДК 72.01

НЕЙРОАРХИТЕКТУРА И ГОРОДСКОЕ СТАРЕНИЕ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЛЯ УЯЗВИМЫХ ГРУПП

♦♦♦♦♦

NEUROARCHITECTURE AND URBAN AGING: DESIGNING FOR VULNERABLE GROUPS

Выпринцева Виолетта Денисовна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
vvyprintseva@yandex.ru

Гулякин Дмитрий Владимирович
доктор педагогических наук,
профессор,
Кубанский государственный технологический университет
dvggti@yandex.ru

Аннотация. Данная статья посвящена исследованию потенциала нейроархитектуры как прикладной строительной дисциплины в решении проблем городского старения, в частности – проектированию и возведению зданий для пожилых людей с когнитивными нарушениями. В отличие от эстетических или теоретических подходов, строительный аспект нейроархитектуры требует пересмотра инженерно-конструктивных решений на всех этапах жизненного цикла здания – от выбора материалов и организации климатического контроля до акустической защиты, навигационных систем и обеспечения безопасности. В статье систематизируются строительные принципы создания терапевтической среды для уязвимых групп пожилого населения, рассматриваются требования к материалам и текстурам поверхностей, цветовым решениям, акустическому комфорту, инженерным системам климат-контроля, безопасности и защите от травм, навигации и ориентации в пространстве, а также интеграции открытых пространств и технологий «умного дома». Авторы делают вывод, что строительный аспект нейроархитектуры представляет собой терапевтическую стратегию, в которой каждый элемент здания – от фактуры пола до типа дверной ручки – может либо снижать когнитивную нагрузку и тревожность, либо усугублять дезориентацию и стресс, что требует системного пересмотра строительных норм и междисциплинарного сотрудничества архитекторов, строителей, нейробиологов и геронтологов.

Ключевые слова: нейроархитектура, городское старение, когнитивные нарушения, строительное проектирование, уязвимые группы, терапевтическая среда, когнитивная доступность, безопасность, нормативная база.

Vyprintseva Violetta Denisovna
Student,
Kuban State Technological University
vvyprintseva@yandex.ru

Gulyakin Dmitry Vladimirovich
Doctor of Pedagogical Sciences,
Professor,
Kuban State Technological University
dvggti@yandex.ru

Annotation. This article is devoted to exploring the potential of neuroarchitecture as an applied construction discipline in addressing the problems of urban aging, in particular, in designing and constructing buildings for elderly people with cognitive impairments. Unlike aesthetic or theoretical approaches, the construction aspect of neuroarchitecture requires a review of engineering and design solutions at all stages of a building's life cycle – from the selection of materials and the organization of climate control to acoustic protection, navigation systems, and safety. The article systematizes the design principles for creating a therapeutic environment for vulnerable groups of the elderly population, examines the requirements for materials and surface textures, color schemes, acoustic comfort, engineering climate control systems, safety and injury prevention, navigation and spatial orientation, as well as the integration of open spaces and «smart home» technologies. The authors conclude that the construction aspect of neuroarchitecture represents a therapeutic strategy in which every element of a building – from the texture of the floor to the type of door handle – can either reduce cognitive load and anxiety or exacerbate disorientation and stress, which requires a systematic review of building codes and interdisciplinary collaboration among architects, builders, neurobiologists, and gerontologists.

Keywords: neuroarchitecture, urban aging, cognitive impairment, building design, vulnerable groups, therapeutic environment, cognitive accessibility, safety, regulatory framework.

Урбанизация и демографическое старение представляют собой два наиболее значительных глобальных процесса, определяющих повестку городского планирования в XXI веке.

Нейроархитектура как прикладная строительная дисциплина требует пересмотра инженерно-конструктивных решений на всех этапах возведения зданий, предназначенных для пожилых людей с когнитивными нарушениями. В отличие от эстетических или теоретических подходов, строительный аспект этой проблематики фокусируется на выборе материалов, организации климатического контроля, акустической защите, навигационных системах и безопасности,

превращая здание не просто в укрытие, а в активного терапевтического помощника, так называемый экзомозг, компенсирующий утраченные когнитивные функции [1].

Материалы и текстуры поверхностей являются одним из ключевых факторов, непосредственно влияющих на психоэмоциональное состояние человека с деменцией. Эмпирические данные, основанные на анализе специализированных учреждений, показывают, что 78 процентов таких объектов используют в интерьерах тёплые материалы, прежде всего дерево или его качественную имитацию, а 69 процентов отдают предпочтение тёплым напольным покрытиям, таким как паркетная доска, дощатые полы или ковролин, которые не только создают ощущение уюта, но и амортизируют удары при падениях, что критично для пожилых людей с нарушенной координацией. Напротив, холодные материалы – мрамор, керамогранит, металлические элементы – вызывают у пациентов с деменцией отторжение и дискомфорт, а гладкие металлические поручни и каменные полы ассоциируются с больничной средой, провоцируя тревожность.

Текстуры поверхностей также подлежат сознательному выбору: исследования рекомендуют использовать гладкие текстуры без излишне сложных графических рисунков, чтобы они не порождали беспокойства, страха или апатии при визуальном или тактильном контакте, при этом в 32 процентах исследованных объектов идентифицировано целенаправленное использование текстур, позволяющих пользователю комфортно взаимодействовать с поверхностями. Особый случай представляет использование необработанной древесины в мультисенсорных пространствах, где она выступает не просто отделочным, но терапевтическим материалом, поскольку её запах и фактура сами по себе являются сенсорными стимулами.

Цветовые решения в таком строительстве являются не вопросом эстетики, а инструментом навигации и эмоциональной регуляции. Общие принципы предписывают использование светлых тонов как на вертикальных, так и на горизонтальных поверхностях, что наблюдается в 78 процентах специализированных объектов, а 22 процента применяют дифференцирующие цветовые элементы для повышения контрастности и идентификации функциональных зон, при этом тёплые цвета преобладают в ночных пространствах и зонах, ассоциируемых с покоем и расслаблением.

Строительная реализация этих принципов включает контрастную окраску стен в разных помещениях для идентификации различных зон, причём цветовое зонирование может выполняться как на этапе отделки с использованием разных красок для разных крыльев здания, так и через использование различных напольных покрытий, а также через контраст между полом и стенами и между дверями и окружающими стенами, что облегчает восприятие границ пространства. Контроль шума является ещё одним ключевым параметром, влияющим на снижение стресса, тревожности и ажитации у людей с деменцией, и строительные решения в этой области включают звукоизоляцию межкомнатных перегородок, установку акустических потолков и звукопоглощающих панелей в общих зонах, использование мягких напольных покрытий для снижения ударного шума и сознательное избегание материалов с высоким коэффициентом отражения звука, таких как голый бетон или кафель в больших объёмах [2].

Климатический контроль и инженерные системы также требуют специализированного подхода: современные системы позволяют создавать персонализированные микроклиматические зоны в пределах одного здания, что особенно важно, поскольку пожилые люди с деменцией могут иметь повышенную чувствительность к холоду или потребность в дополнительной вентиляции в зонах физической активности. Инженерные решения, закреплённые в нормативных документах, предписывают ограничение температуры горячей воды на выходе из крана до 40–50 градусов Цельсия для предотвращения ожогов, установку термостатических смесителей для стабилизации температуры воды, скрытую прокладку всех трубопроводов в зонах общего пользования и санузлах с замоноличиванием или размещением за фальшпанелями для предотвращения ожогов и травм, качественную изоляцию канализационных стояков для предотвращения проникновения запахов и шума, системы автоматического перекрытия воды при обнаружении утечки, а также установку водосчётчиков и систем мониторинга качества воды. Противопожарные и инженерные решения требуют скрытия всех коммуникаций внутри стен или под фальшполами для предотвращения случайных травм, установки датчиков дыма и утечки газа с автоматическим оповещением и использования электроприборов с защитой от перегрева [3].

Предотвращение падений, являющееся одной из главных строительных задач, достигается через применение противоскользящих напольных покрытий во всех зонах, установку поручней с обеих сторон коридоров, устройство пологих пандусов вместо лестниц везде, где это возможно, и отсутствие порогов в дверных проёмах. Безопасность дверных конструкций предусматривает двери, открывающиеся в обе стороны или имеющие наружное открывание, чтобы человек не мог случайно заблокировать себя внутри, использование ручек-рычагов вместо круглых ручек, поскольку они легче захватываются при ослабленной моторике, и установку

смотровых окон в дверях для визуального контроля со стороны персонала. Защита от блуждания, или элопинга, требует применения скрытых систем контроля доступа на выходных дверях, которые не выглядят как запирающие устройства, чтобы не провоцировать тревогу, но предотвращают неконтролируемый выход. Навигация и ориентация в пространстве, представляющие серьёзную трудность для людей с когнитивными нарушениями, облегчаются через упрощённую планировку с минимумом коридоров и развилок и линейными маршрутами, установку визуальных ориентиров в виде узнаваемых объектов в ключевых точках, контрастную маркировку функциональных зон цветом и текстурой, а также мультисенсорную навигационную систему с визуальными, тактильными и звуковыми подсказками, при этом знаковое ориентирование должно использовать крупный шрифт, высокую контрастность и пиктограммы, а не только текст [4].

Выход на открытые пространства и контакт с природой являются важнейшим строительным аспектом, подтверждённым данными о том, что 72 процента исследованных зданий имеют прямую связь с открытыми пространствами, где присутствует естественная растительность с соответствующими запахами, причём терапевтические сады и огороженные прогулочные зоны должны быть доступны непосредственно из жилых помещений, а окна должны располагаться на уровне глаз сидячего человека, чтобы пожилые люди, проводящие много времени в кресле, могли видеть природу. Интеграция технологий превращает здание в активного помощника: системы умного дома с голосовым управлением для освещения, отопления и вызова помощи, датчики движения и присутствия, автоматически включающие свет в ночное время, системы напоминаний о приёме лекарств и времени приёма пищи, а также интерактивные панели с расписанием и фотографиями близких – всё это делает среду обитания внешним когнитивным протезом, активно поддерживающим человека с деменцией и компенсирующим утраченные функции памяти и ориентации.

Нейроархитектура как прикладная строительная дисциплина переосмысляет саму суть проектирования и возведения зданий, предназначенных для пожилых людей с когнитивными нарушениями. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на усреднённого здорового пользователя, данный подход требует системного учёта нейросенсорных и когнитивных особенностей стареющего человека на всех этапах строительства – от выбора материалов и инженерных систем до организации навигации и безопасности. Строительный аспект этой проблематики превращает здание из пассивного убежища в активного терапевтического помощника, способного компенсировать утраченные функции памяти, ориентации и эмоциональной регуляции.

Ключевым выводом проведённого анализа является признание того, что каждый элемент застройки – фактура пола, цвет стен, тип дверной ручки, уровень шума, качество освещения, температурный режим, наличие контакта с природой – может либо снижать когнитивную нагрузку и тревожность, либо, напротив, усугублять дезориентацию и стресс. Тёплые, тактильно приятные материалы, контрастная цветовая маркировка, продуманная акустика, скрытые инженерные коммуникации, противоскользящие покрытия и системы «умного дома» формируют среду, которая не просто безопасна физически, но и поддерживает остаточные когнитивные способности, снижает ажитацию и способствует социальной включённости. Выход на открытые озеленённые пространства и визуальный контакт с природой становятся не дополнительной опцией, а обязательным элементом, укрепляющим психоэмоциональное здоровье и уменьшающим социальную изоляцию, которая так характерна для этой уязвимой группы [5].

Литература

1. Гордеева А.Э. Нейроархитектура: архитектура, влияющая на чувства людей / А.Э. Гордеева, Р.К. Мухитов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 2(60).
2. Иванова С.С. Нейроурбанистика как новый подход в проектировании городской среды для пожилых людей / С.С. Иванова, В.Н. Петров // Архитектура и строительство России. – 2023. – № 4. – С. 42–49.
3. Смирнова Е.А. Когнитивная доступность городской среды: нейроархитектурный подход / Е.А. Смирнова, Д.А. Кузнецов // Градостроительство. – 2024. – № 1(71). – С. 28–35.
4. Алексеева Н.В. Принципы нейроархитектуры в проектировании специализированных жилых комплексов для лиц с когнитивными расстройствами / Н.В. Алексеева, А.А. Соловьёв // Жилищное строительство. – 2024. – № 5. – С. 33–39.
5. Тимофеева Л.К. Нейроэстетика и архитектурное проектирование: от теории к практике создания здоровьесберегающей среды / Л.К. Тимофеева, Е.В. Григорьева // Архитектон: известия вузов. – 2025. – № 1(69). – С. 12–21.

References

1. Gordeeva A.E. Neuroarchitecture: architecture that influences people's feelings / A.E. Gordeeva, R.K. Mukhitov // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2022. – № 2(60).
2. Ivanova S.S. Neurourbanistics as a new approach to designing urban environments for older people / S.S. Ivanova, V.N. Petrov // Architecture and Construction of Russia. – 2023. – No. 4. – P. 42–49.
3. Smirnova E.A. Cognitive accessibility of the urban environment: a neuroarchitectural approach / E.A. Smirnova, D.A. Kuznetsov // Gradostroitelstvo. – 2024. – № 1(71). – P. 28–35.
4. Alekseeva N.V. Principles of neuroarchitecture in the design of specialized residential complexes for people with cognitive disorders / N.V. Alekseeva, A.A. Solovyov // Housing Construction. – 2024. – № 5. – P. 33–39.
5. Timofeeva L.K. Neuroaesthetics and architectural design: from theory to practice of creating a health-preserving environment / L.K. Timofeeva, E.V. Grigorieva // Architekton: university proceedings. – 2025. – № 1(69). – P. 12–21.

УДК 624.012.45

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ДЛЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЁТОМ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

♦♦♦♦♦

DEVELOPMENT OF RESIDUAL LIFE CRITERIA FOR FLEXURAL ELEMENTS CONSIDERING DAMAGE ACCUMULATION

Выпринцева Виолетта Денисовна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
vvyprintseva@yandex.ru

Долгополов Василий Евгеньевич
старший преподаватель,
Кубанский государственный технологический университет
dolgopolov_v@icloud.com

Данько Владислав Павлович
кандидат технических наук,
доцент кафедры,
Кубанский государственный технологический университет
Vladislav.danko@mail.ru

Аннотация. Рассматривается проблема оценки остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов при накоплении повреждений. В статье проанализирована разработка системы критериев, учитывающих накопленные дефекты и позволяющих прогнозировать момент достижения предельного состояния. Особое внимание авторы статьи уделяют коррозионным повреждениям арматуры и усталостным процессам, которые являются наиболее распространёнными причинами снижения остаточного ресурса. Обоснована необходимость применения нелинейных кинетических моделей накопления повреждений, поскольку линейная гипотеза не отражает ускорения деградации. В статье разработан алгоритм практического применения системы критериев, включающий натурное обследование, поверочный расчёт повреждённого сечения, прогнозирование изменения параметров во времени и определение остаточного ресурса как минимального из полученных значений. Предложенные критерии предназначены для обоснования решений о дальнейшей эксплуатации, назначении сроков ремонтов и усиления конструкций.

Ключевые слова: остаточный ресурс, изгибаемые элементы, железобетон, накопление повреждений, коррозия арматуры, критерии предельных состояний, долговечность, обследование конструкций.

Vyprintseva Violetta Denisovna
Student,
Kuban State Technological University
vvyprintseva@yandex.ru

Dolgopolov Vasily Evgenievich
Senior Lecturer,
Kuban State University of Technology
dolgopolov_v@icloud.com

Danko Vladislav Pavlovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department,
Kuban State Technological University
Vladislav.danko@mail.ru

Annotation. The problem of assessing the residual life of reinforced concrete flexural elements under damage accumulation is considered. The article analyzes the development of a system of criteria that take into account accumulated defects and allow predicting the moment of reaching the limit state. The authors pay special attention to corrosion damage of reinforcement and fatigue processes, which are the most common causes of residual life reduction. The necessity of using nonlinear kinetic models of damage accumulation is substantiated, since the linear hypothesis does not reflect the acceleration of degradation. The article develops an algorithm for the practical application of the system of criteria, including field inspection, verification calculation of the damaged section, prediction of parameter changes over time, and determination of residual life as the minimum of the obtained values. The proposed criteria are intended to justify decisions on further operation, scheduling of repairs and strengthening of structures.

Keywords: residual life, flexural elements, reinforced concrete, damage accumulation, reinforcement corrosion, limit state criteria, durability, structural inspection.

Эксплуатация железобетонных конструкций сопровождается накоплением повреждений, снижающих их несущую способность и эксплуатационные качества. Коррозионное поражение бетона и арматуры, усталостные процессы, ползучесть и раскрытие трещин приводят к постепенной деградации материала и изменению расчётной схемы работы элемента. Действующие нормы проектирования ориентированы на вновь возводимые конструкции и не устанавливают обязательных требований к определению остаточного ресурса эксплуатируемых элементов [1]. Нормирование ресурса и срока службы железобетонных конструкций выполняется обобщённо, имеет рекомендательный характер и не учитывает фактическое техническое состояние объекта [2]. В результате специалисты при обследовании вынуждены применять методики, разработанные для отдельных типов конструкций и условий эксплу-

атации, либо опираться на экспертные оценки, что снижает достоверность выводов о возможности дальнейшей эксплуатации.

На данный момент существуют четыре подхода к определению остаточного ресурса.

Нормативно-инженерный подход основан на сопоставлении фактических параметров напряжённо-деформированного состояния с предельными значениями, установленными нормами проектирования [3]. Остаточный ресурс определяется как минимальная величина из отношений действующих усилий к предельным, фактических прогибов и ширин раскрытия трещин к допустимым значениям. Подход обеспечивает простоту и доступность практического применения, однако характеризует только текущее состояние конструкции и не позволяет прогнозировать его изменение во времени под воздействием продолжающихся процессов деградации.

Физико-статистический подход базируется на обработке статистических данных о накоплении повреждений в конструкциях-аналогах и построении вероятностных моделей изменения остаточного ресурса. Подход учитывает детерминированные и случайные факторы, влияющие на долговечность, а окончательная величина ресурса устанавливается с коэффициентом надёжности. Ограничение подхода состоит в необходимости наличия представительной базы данных о поведении конструкций в конкретных условиях эксплуатации.

Кинетический подход основан на моделях накопления повреждений и теории надёжности. Процесс деградации описывается функцией поврежденности, изменяющейся от нуля в начальный момент эксплуатации до единицы в момент достижения предельного состояния. Применяются линейная гипотеза накопления повреждений и нелинейные модели, учитывающие историю нагружения и взаимодействие механизмов деградации. Линейная гипотеза не отражает эффекты упрочнения и разупрочнения материала, а также взаимодействие различных механизмов повреждения, что ограничивает её применение для конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах и под действием интенсивных циклических нагрузок.

Деформационно-энергетический подход основан на анализе удельной энергии деформирования и пластического ресурса материала. Остаточная несущая способность определяется на основе уравнений остаточной прочности бетона сжатой зоны и растянутой арматуры с учётом накопленных дефектов. Ключевыми параметрами являются пластический ресурс и удельная энергия деформирования, количественно характеризующие степень исчерпания несущей способности материала. Подход обладает наибольшей физической обоснованностью, однако требует детальных данных о свойствах повреждённых материалов и выполнения сложных расчётов.

Методы на основе искусственных нейронных сетей обеспечивают высокую точность прогнозирования остаточной прочности и несущей способности элементов с коррозионным повреждением арматуры. Ограничения данных методов связаны с необходимостью формирования обучающих выборок, репрезентативных для конкретных условий эксплуатации, и сложностью инженерной интерпретации получаемых результатов.

Ни один из рассмотренных подходов не является универсальным. Наиболее достоверная оценка остаточного ресурса достигается при комплексном применении нормативно-инженерного подхода для характеристики текущего состояния конструкции и кинетических моделей для прогнозирования его изменения во времени.

Разработка системы критериев остаточного ресурса требует определения предельного состояния изгибаемого элемента. Нормами проектирования установлены две группы предельных состояний: по несущей способности и по эксплуатационной пригодности. Для эксплуатируемых конструкций данного разделения недостаточно, поскольку необходимо учитывать специфические механизмы деградации, не характерные для вновь возводимых элементов. Выделяется три группы критериев, соответствующих трём группам предельных состояний, и дополнительный критерий долговечности.

Критерии по несущей способности основаны на сопоставлении действующих усилий с предельными значениями для повреждённого сечения. Предельный изгибающий момент определяется с учётом фактической площади поперечного сечения арматуры, уменьшенной вследствие коррозионных потерь, фактической прочности бетона сжатой зоны, сниженной вследствие коррозионного разрыхления и накопления микротрещин, а также изменения плеча внутренней пары сил. Предельная поперечная сила определяется с дополнительным учётом снижения прочности бетона на растяжение и ухудшения сцепления арматуры с бетоном. Критерий остаточного ресурса по несущей способности формулируется как условие непревышения действующими усилиями предельных значений в течение прогнозируемого срока дальнейшей эксплуатации. Ресурс исчерпывается в момент достижения действующим усилием предельного значения с учётом коэффициента надёжности [4].

Критерии по деформативности основаны на сопоставлении фактических прогибов элемента с предельно допустимыми значениями. Для эксплуатируемых конструкций предельные

прогибы корректируются с учётом технологических требований и условий эксплуатации. Прогибы повреждённых элементов развиваются более интенсивно, чем неповреждённых, вследствие снижения жёсткости сечения, обусловленного уменьшением эффективной площади бетона сжатой зоны и развитием трещин. Критерий остаточного ресурса по деформативности исчерпывается в момент достижения прогнозируемым прогибом предельно допустимого значения.

Критерии по трещиностойкости включают ширину раскрытия трещин, их количество и глубину проникновения в сечение элемента. Ширина раскрытия нормальных трещин является диагностическим признаком снижения эффективной площади растянутого бетона, ухудшения сцепления арматуры с бетоном и повышения риска коррозии арматуры. Образование наклонных трещин в зоне действия поперечных сил указывает на опасность хрупкого разрушения по наклонному сечению. Критерий остаточного ресурса по трещиностойкости исчерпывается при достижении шириной раскрытия трещин предельно допустимых значений или при появлении трещин, свидетельствующих о качественном изменении характера работы элемента.

Дополнительный критерий долговечности характеризует скорость приближения конструкции к предельному состоянию и основан на оценке интенсивности накопления повреждений во времени по результатам повторных обследований или мониторинга. Превышение скоростью накопления повреждений порогового значения указывает на возможность исчерпания остаточного ресурса ранее срока, определяемого экстраполяцией текущих параметров состояния. Введение данного критерия обеспечивает учёт нелинейности процессов деградации и позволяет выявить конструкции, требующие первоочередного внимания.

Корректный учёт накопления повреждений является центральной проблемой при построении критериев остаточного ресурса. Процесс накопления повреждений в изгибаемом железобетонном элементе описывается как последовательность стадий. На начальной стадии эксплуатации преобладают ползучесть бетона и релаксация напряжений. На второй стадии проявляются коррозионные процессы, скорость которых определяется агрессивностью среды и защитными свойствами бетона, и накапливаются усталостные повреждения в арматуре под действием циклических нагрузок. Третья стадия характеризуется прогрессирующим развитием повреждений, снижением несущей способности и возрастанием риска внезапного разрушения.

Для количественного описания накопления повреждений применяется мера поврежденности, изменяющаяся от нуля до единицы. При линейной гипотезе мера поврежденности определяется как сумма отношений числа циклов нагружения определённого уровня к числу циклов, вызывающих разрушение при данном уровне, или как сумма относительных длительностей воздействия агрессивных факторов. Линейная гипотеза не учитывает взаимодействие различных механизмов повреждения и эффекты упрочнения или разупрочнения материала. Нелинейные модели учитывают зависимость скорости накопления повреждений от текущего уровня поврежденности, что отражает ускорение деградации по мере приближения к предельному состоянию [5].

Для коррозионных повреждений, являющихся наиболее распространённой причиной снижения остаточного ресурса изгибаемых элементов, процесс описывается двумя стадиями. Инкубационный период характеризуется накоплением агрессивных веществ в защитном слое бетона; его продолжительность определяется толщиной защитного слоя, проницаемостью бетона и концентрацией агрессивных агентов в окружающей среде. Период активной коррозии характеризуется растворением арматуры; скорость потери сечения арматуры определяется плотностью коррозионного тока, зависящей от влажности, температуры и наличия кислорода. Прогнозирование остаточного ресурса требует знания кинетики коррозионных процессов, что достигается проведением длительных натурных наблюдений или ускоренных испытаний с последующей экстраполяцией результатов [6].

Учёт истории нагружения при оценке накопления повреждений требует информации о фактических нагрузках, действовавших на конструкцию в течение срока эксплуатации. При отсутствии данных мониторинга нагрузки восстанавливаются приближённо на основе анализа технологических процессов и статистических данных о временных нагрузках. Для конструкций, подверженных действию циклических нагрузок, накопление усталостных повреждений оценивается расчётом на выносливость с использованием гипотез суммирования усталостных повреждений. Усталостная долговечность арматуры в бетоне зависит от наличия и ширины раскрытия трещин, поскольку коррозионная среда, проникающая к арматуре через трещины, ускоряет зарождение и развитие усталостных трещин [7].

Практическое применение предложенной системы критериев включает четыре этапа. На первом этапе выполняется натурное обследование конструкции, в ходе которого фиксируются наличие и ширина раскрытия нормальных и наклонных трещин, состояние защитного слоя бетона, степень коррозионного поражения арматуры, определяемая по площади поперечного сечения после удаления продуктов коррозии, прочность бетона сжатой зоны, определяемая неразрушающими методами или по результатам испытаний образцов, отобранных из конструк-

ции, и фактические прогибы элемента. Приоритетное внимание уделяется зонам с недостаточной толщиной защитного слоя, местам образования трещин и зонам переменного замораживания-оттаивания.

На втором этапе выполняется поверочный расчёт несущей способности повреждённого сечения с использованием фактических характеристик материалов и геометрических параметров, установленных при обследовании. Площадь растянутой арматуры принимается уменьшенной на величину коррозионных потерь, прочность бетона сжатой зоны – сниженной в соответствии со степенью коррозионного разрыхления, учитывается снижение сцепления арматуры с бетоном. По результатам расчёта определяются текущие значения предельных усилий, прогибов и ширины раскрытия трещин.

На третьем этапе выполняется прогнозирование изменения параметров состояния во времени с использованием кинетических моделей накопления повреждений, выбор которых определяется преобладающим механизмом деградации. При коррозии арматуры применяется модель потери сечения арматуры во времени с учётом плотности коррозионного тока. При усталостных процессах применяется модель накопления усталостных повреждений с учётом фактической истории нагружения. При деформациях ползучести применяется наследственная теория вязкоупругости с переменными параметрами. Результатом прогнозирования является зависимость каждого контролируемого параметра от времени.

На четвёртом этапе остаточный ресурс определяется по каждому критерию как время достижения соответствующим параметром предельного значения. Итоговая величина остаточного ресурса принимается равной минимальному из полученных значений, что обеспечивает консервативность оценки. Вычисляется коэффициент надёжности по ресурсу, учитывающий неопределённость исходных данных и погрешность прогноза. Решение о возможности дальнейшей эксплуатации конструкции принимается с учётом полученной величины остаточного ресурса, коэффициента надёжности и требований нормативных документов к периодичности обследований и ремонтов [8].

Существующие подходы к оценке остаточного ресурса изгибаемых элементов обладают различными преимуществами и ограничениями; ни один из них не является универсальным. Наиболее достоверная оценка достигается при комплексном применении нормативно-инженерного подхода для характеристики текущего состояния конструкции и кинетических моделей для прогнозирования его изменения во времени. Предложенная система критериев, включающая критерии по несущей способности, деформативности, трещиностойкости и дополнительный критерий долговечности, обеспечивает учёт различных механизмов достижения предельного состояния. Для изгибаемых железобетонных элементов с накопленными повреждениями определяющим, как правило, является критерий по несущей способности; при значительных прогибах, не сопровождающихся снижением прочности, более жёстким может оказаться критерий по деформативности. Обоснована необходимость применения нелинейных кинетических моделей накопления повреждений, поскольку линейная гипотеза не отражает ускорения деградации по мере приближения к предельному состоянию. Предложенный алгоритм практического применения системы критериев предназначен для использования специалистами по обследованию зданий и сооружений при обосновании решений о возможности дальнейшей эксплуатации, назначении сроков ремонтов и усиления, а также при определении остаточного ресурса конструкций, подлежащих реконструкции. Дальнейшее развитие работы целесообразно направить на разработку программных средств, реализующих предложенные критерии, и на формирование баз данных о накоплении повреждений в конструкциях, эксплуатируемых в характерных для России условиях.

Литература

1. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2019. – 148 с.
2. РД 09-102-95. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России. – М., 1995.
3. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М. : Стандартинформ, 2016. – 24 с.
4. Прикладной способ прогнозирования коррозионных повреждений и остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с учетом опыта эксплуатации объектов-аналогов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 5. – С. 42–50.
5. Смоляго Г.А. Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями / Г.А. Смоляго, Н.В. Фролов // Вестник

Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 6. – С. 119–130.
6. Мирсаяпов И.Т. Оценка остаточной несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 2. – С. 6–14.
7. Морозова Л.Н. Определение долговечности железобетонных автодорожных мостов / Л.Н. Морозова, В.В. Пархоменко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2024. – № 1. – С. 45–52.
8. Бондаренко В.М. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 2. – С. 28–31.

References

1. SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions. – M. : Standartinform, 2019. – 148 p.
2. RD 09-102-95. Methodological Guidelines for Determining the Residual Life of Potentially Hazardous Facilities Supervised by Gosgortekhnadzor of Russia. – M., 1995.
3. GOST 27.002-2015. Reliability in Engineering. Terms and Definitions. – M. : Standartinform, 2016. – 24 p.
4. Applied Method for Predicting Corrosion Damage and Residual Life of Flexural Reinforced Concrete Elements Taking into Account the Operating Experience of Analogous Objects // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2019. – № 5. – P. 42–50.
5. Smolyago G.A. Modern Approaches to Calculating the Residual Life of Flexural Reinforced Concrete Elements with Corrosion Damage / G.A. Smolyago, N.V. Frolov // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Building. – 2019. – № 6. – P. 119–130.
6. Mirsayapov I.T. Assessment of the Residual Bearing Capacity of Operated Reinforced Concrete Structures // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2022. – № 2. – P. 6–14.
7. Morozova L.N. Determination of Durability of Reinforced Concrete Road Bridges / L.N. Morozova, V.V. Parkhomenko // Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2024. – № 1. – P. 45–52.
8. Bondarenko V.M. Concept and Directions of Development of the Theory of Structural Safety of Buildings and Structures under Force and Environmental Impacts / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov // Industrial and Civil Construction. – 2013. – № 2. – P. 28–31.

УДК 692.54

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МОНТАЖА РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПОДВЕСНЫХ ПОТОЛКОВ: АНАЛИЗ СЛОЖНОСТИ УСТАНОВКИ И ТРЕБОВАНИЙ К ПОДГОТОВКЕ ОСНОВАНИЯ

♦♦♦♦♦

TECHNOLOGICAL FEATURES OF INSTALLATION OF VARIOUS TYPES OF SUSPENDED CEILINGS: ANALYSIS OF INSTALLATION COMPLEXITY AND REQUIREMENTS FOR BASE PREPARATION

Выпринцева Виолетта Денисовна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
vvyprintseva@yandex.ru

Шестакова Елена Владимировна
старший преподаватель,
Кубанский государственный технологический университет
elena_shestakova_1979@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлен сравнительный анализ технологических особенностей монтажа различных типов подвесных потолков, включая модульные, натяжные, гипсокартонные, реечные конструкции. Рассмотрены ключевые этапы установки, особенности каркасных систем, требования к подготовке чернового основания и условиям проведения монтажных работ. Особое внимание уделено преимуществам акустических конструкций, сложности выполнения работ. Материалы статьи ориентированы на специалистов в области строительства и проектирования, а также на заказчиков, стремящихся создать оптимальные акустические условия в коммерческих и жилых помещениях.

Ключевые слова: подвесные потолки, монтаж, строительство, конструкции, каркасные системы, технологические особенности.

Vyprintseva Violetta Denisovna
Student,
Kuban State Technological University
vvyprintseva@yandex.ru

Shestakova Elena Vladimirovna
Senior Lecturer,
Kuban State Technological University
elena_shestakova_1979@mail.ru

Annotation. This article presents a comparative analysis of the technological features of installation of various types of suspended ceilings, including modular, stretch, plasterboard, and slatted structures. The key installation stages, features of frame systems, requirements for preparing the rough base, and conditions for installation work are considered. Particular attention is paid to the advantages of acoustic structures and the complexity of performing the work. The materials of the article are aimed at specialists in the field of construction and design, as well as at customers seeking to create optimal acoustic conditions in commercial and residential premises.

Keywords: suspended ceilings, installation, construction, structures, frame systems, technological features.

Подвесные потолки представляют собой одну из наиболее востребованных конструкций в современном строительстве и ремонте помещений. Являясь неотъемлемым элементом современного дизайна интерьера, они выполняют не только эстетическую, но и функциональную роль. Они позволяют скрыть коммуникации, улучшить акустику помещения, повысить тепло- и звукоизоляцию, а также создать уникальные световые решения. Однако, несмотря на кажущуюся простоту, монтаж подвесных потолков представляет собой сложный технологический процесс, требующий точного соблюдения определенных правил и норм. Разнообразие типов подвесных систем обуславливает специфические требования к их установке и подготовке основания. Согласно данным Росстата, в России объем рынка подвесных потолков вырос на 15–20 % ежегодно в период с 2018 по 2024 год, что обусловлено развитием коммерческого и жилого строительства [1].

Монтаж подвесных потолков сопряжен с рядом технологических вызовов, включая выбор подходящего типа конструкции, оценку сложности установки и обеспечение надлежащей подготовки основания. Недостаточная подготовка может привести к деформациям, снижению долговечности или даже аварийным ситуациям.

Подвесные потолки классифицируются по материалам и конструктивным особенностям [2].

Модульные потолки представляют собой конструкции, состоящие из отдельных панелей, которые крепятся к каркасу. Основные материалы для панелей включают минеральные волокна, металл и пластик. Преимущества модульных потолков заключаются в их легкости, простоте монтажа и возможности быстрого демонтажа для доступа к инженерным коммуникациям. Однако для обеспечения долговечности и надежности, требуется тщательная подготовка основания, включая выравнивание поверхности и устранение дефектов.

Сложность установки модульных потолков оценивается на уровне 2–3 баллов. Основные трудности связаны с точным выравниванием каркаса и обеспечением ровной поверхности основания. Основание должно быть ровным, без значительных перепадов высоты. Допустимые отклонения не должны превышать 5 мм на 2 м длины. Поверхность должна быть очищена от пыли и грязи, а также обработана антисептическими составами для предотвращения появления плесени.

Натяжные потолки представляют собой полотна из ПВХ или ткани, которые натягиваются на каркас. Они отличаются высокой эстетикой, разнообразием цветов и фактур, а также возможностью создания сложных геометрических форм. Однако монтаж натяжных потолков требует высокой квалификации специалистов и специального оборудования [3].

Сложность установки натяжных потолков оценивается на уровне 4–5 баллов. Основные трудности связаны с необходимостью точного натяжения полотна и обеспечением его равномерного распределения по поверхности. Основание должно быть ровным, без значительных перепадов высоты. Допустимые отклонения не должны превышать 3 мм на 2 м длины. Поверхность, так, как и у модульных потолков, должна быть очищена от пыли и грязи, а также обработана антисептическими составами для предотвращения появления плесени.

Особое внимание стоит обратить на использование мягких поливинилхлоридных материалов, в которые введены пластифицирующие добавки: эти компоненты способны постепенно покидать изделие и вместе с остатками мономера и продуктами распада создавать длительную нагрузку на организм. При этом в настоящее время не существует нормативного документа, позволяющего непрерывно контролировать выход опасных летучих соединений (в частности, хлорвинила и пластификаторов) в течение всего периода службы конструкции. Все регламентированные национальными нормативами процедуры воспроизводят лишь искусственные, ускоренные сценарии и не отражают фактическую картину многолетнего выделения. Между тем даже ничтожные концентрации хлорвинила и ряда других токсичных примесей при продолжительном попадании в дыхательные пути могут инициировать злокачественные новообразования и другие отдаленные патологии. Поэтому решение о применении подобных потолочных конструкций должно приниматься только после тщательного сопоставления потенциального вреда и реальных выгод [4].

Гипсокартонные потолки представляют собой конструкции, состоящие из гипсокартонных листов, которые крепятся к металлическому каркасу. Они отличаются высокой прочностью, долговечностью и возможностью создания сложных геометрических форм. Основные преимущества гипсокартонных потолков включают возможность создания сложных многоуровневых конструкций, а также высокую звукоизоляцию и теплоизоляцию. Подготовка основания для гипсокартонных потолков требует тщательной очистки и выравнивания поверхности, так как гипсокартонные листы должны плотно прилегать к каркасу. Сложность установки гипсокартонных потолков заключается в необходимости точного выравнивания каркаса и обеспечения плотного прилегания гипсокартонных листов [5].

Реечные подвесные потолки состоят из алюминиевых или стальных реек, которые крепятся к каркасу, подвешенному к основному потолку. Основные преимущества таких потолков включают высокую прочность, долговечность и возможность создания различных дизайнерских решений. Монтаж реечных потолков требует тщательной подготовки основания, так как поверхность должна быть ровной и чистой. Каркас устанавливается с использованием подвесов и направляющих профилей, что позволяет скрыть коммуникации и обеспечить равномерное распределение нагрузки. Сложность установки реечных потолков заключается в необходимости точного выравнивания реек и обеспечения их плотного прилегания к каркасу [6].

Каждый из этих типов имеет свои конструктивные особенности, которые напрямую влияют на сложность монтажа и требования к подготовке основания.

Акустические подвесные потолки занимают особое место среди многофункциональных решений. Их основная задача – управление звуком в помещении, что достигается за счет использования специальных материалов с высокой степенью звукопоглощения, звукоизоляции и применения конструктивных решений, направленных на снижение уровня шума и улучшение акустического комфорта [7].

Сложность установки варьируется от средней до высокой, в зависимости от типа акустических панелей и сложности конструкции. Монтаж некоторых систем, особенно с использованием перфорированных панелей и специальных звукопоглощающих подложек, требует высокой квалификации и внимания к деталям. Важно обеспечить герметичность стыков и правильное расположение звукопоглощающих материалов.

Требования к подготовке основания для акустических потолков, как правило, более строгие, чем для стандартных систем. Основание должно быть ровным, прочным и, в идеале, обладать хорошей звукоизоляцией. Неровности могут привести к нарушению целостности акустического слоя и снижению эффективности звукопоглощения. Для некоторых систем, особенно тех, что предполагают монтаж непосредственно к перекрытию или с минимальным зазором, требуется идеальная ровность основания. Крепление несущих конструкций должно быть максимально надежным, чтобы выдерживать вес не только самого потолка, но и дополнительного

звукоизоляционного слоя. Важно также учитывать необходимость создания воздушного зазора между основным перекрытием и подвесным потолком, который играет существенную роль в акустических характеристиках. Этот зазор может быть заполнен дополнительными звукопоглощающими материалами, такими как минеральная вата или акустические плиты, что еще больше усложняет монтаж и требует точного расчета.

Главное преимущество – это способность значительно улучшать акустику помещения, снижая эхо, реверберацию и общий уровень шума. Это критически важно для таких помещений, как концертные залы, студии звукозаписи, переговорные комнаты, офисы открытого типа, учебные заведения и медицинские учреждения. Помимо акустических свойств, многие акустические потолки обладают и другими полезными характеристиками: они могут быть негорючими, влагостойкими, иметь высокие показатели теплоизоляции и эстетически привлекательный внешний вид. Современные акустические потолки предлагают широкий спектр дизайнерских решений, позволяя интегрировать их в любой интерьер.

Выбор типа подвесного потолка зависит от множества факторов, включая эстетические предпочтения, функциональные требования и бюджет. Каждый тип потолка имеет свои технологические особенности монтажа, которые необходимо учитывать при планировании работ. Подготовка основания играет ключевую роль в успешной установке, так как от этого зависит долговечность и внешний вид потолка. Правильный подход к выбору и монтажу подвесного потолка позволит создать комфортное и стильное пространство, соответствующее всем современным требованиям.

При выборе типа подвесного потолка также необходимо учитывать климатические условия региона, в котором находится помещение. Например, в районах с высокой влажностью, таких как прибрежные зоны, предпочтение следует отдавать материалам, устойчивым к воздействию влаги. Реечные потолки из алюминия или специальных влагостойких панелей могут стать оптимальным решением, так как они не подвержены коррозии и легко очищаются от загрязнений. В то же время, в регионах с низкой влажностью можно использовать гипсокартонные потолки, которые обеспечивают отличную звукоизоляцию и могут быть оформлены в различных стилях.

Не менее важным аспектом является экологическая безопасность материалов, используемых для монтажа подвесных потолков. В последние годы наблюдается рост интереса к экологически чистым и безопасным для здоровья материалам. Например, гипсокартонные потолки, изготовленные из переработанных материалов, могут стать хорошим выбором для тех, кто заботится о состоянии окружающей среды. Также стоит обратить внимание на наличие сертификатов качества и безопасности у используемых материалов, что гарантирует отсутствие вредных веществ в их составе.

Эстетические предпочтения также играют ключевую роль в выборе подвесного потолка. Разнообразие текстур, цветов и форм позволяет создать уникальный интерьер, соответствующий стилю помещения. Например, натяжные потолки могут быть выполнены в глянцевом или матовом варианте, что позволяет визуально изменить восприятие пространства. Гладкая поверхность натяжного потолка отражает свет, что может сделать помещение более светлым и просторным. В то же время, гипсокартонные потолки позволяют создавать сложные архитектурные формы, что может стать акцентом в интерьере.

При проектировании интерьера важно учитывать не только внешний вид потолка, но и его функциональность. Например, в жилых помещениях, где важна атмосфера уюта и комфорта, можно использовать натяжные потолки с мягкими текстурами и теплой цветовой гаммой. В то же время, в коммерческих помещениях, таких как офисы или магазины, предпочтение может быть отдано более строгим и современным решениям, таким как реечные или кассетные потолки, которые подчеркивают стиль и создают профессиональную атмосферу.

Функциональные характеристики потолков также важны. Например, в офисных помещениях, где требуется высокая звукоизоляция, лучше использовать гипсокартонные потолки, которые могут быть дополнены звукоизоляционными материалами. В помещениях, где необходимо скрыть инженерные коммуникации, кассетные потолки могут стать идеальным решением, так как они позволяют легко получить доступ к проводам и трубам.

Анализ технологических особенностей монтажа различных типов подвесных потолков наглядно демонстрирует, что современные строительные и ремонтные решения стремятся к многофункциональности. Если ранее подвесные потолки рассматривались в основном как средство маскировки коммуникаций и улучшения эстетики, то сегодня их роль значительно расширилась.

Гипсокартонные потолки предоставляют безграничные возможности для дизайна, но требуют дополнительной отделки для достижения желаемых акустических или теплоизоляционных свойств.

В этом контексте акустические подвесные потолки выступают как наиболее полное и многофункциональное решение, закрывающее все вопросы и решают одну из наиболее актуальных проблем современного строительства и дизайна – управление звуковой средой [8]. Благодаря своей способности поглощать и рассеивать звуковые волны, они создают комфортные

акустические условия, что напрямую влияет на производительность, концентрацию и общее самочувствие людей в помещении. Более того, современные акустические потолки могут быть интегрированы с системами освещения, вентиляции и даже пожаротушения, становясь центральным элементом комплексного решения для потолочного пространства. Сложность их монтажа, хотя и выше, чем у некоторых других типов, оправдывается достигаемым эффектом и долгосрочной выгодой от улучшения акустического комфорта.

Литература

1. Аналитический отчет по результатам анализа состояния конкуренции на товарном рынке подвесных потолочных конструкций (систем) // ФАС России. – URL : https://fas.gov.ru/documents/651405
2. Стецкий С.В. Подвесные потолки: функция и эстетика в интерьерах помещений гражданских зданий / С.В. Стецкий, К.О. Ларионова, Т.А. Якунина // Инновации и инвестиции. – 2023. – № 2. – С. 184–186.
3. Галюжин С.Д. Эффективность установки натяжных потолков в производственных зданиях предприятий транспортного машиностроения / С.Д. Галюжин, О.М. Любикова // Транспортное машиностроение. – 2022. – № 08(8). – С. 56–66.
4. ГОСТ Р ИСО 16000-6-2023. Воздух замкнутых помещений. – Ч. 6. Определение летучих органических соединений в воздухе замкнутых помещений и испытательных камер методом активного отбора проб на сорбент с последующей термодесорбцией и газохроматографическим анализом с масс-селективным детектированием. – М. : Российский институт стандартизации, 2023.
5. Изотов Е.А. Гипсокартон. Описание и применение в строительстве // Наука и образование сегодня. – 2020. – С. 23–24.
6. Заграничнова Л.А. Методика расчета материалов реечного подвесного потолка. Дизайн проектов / Л.А. Заграничнова, А.В. Бушмина // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. – 2017. – С. 226–232.
7. Герасимов А.И. К вопросу применения акустических подвесных потолков с малой высотой крепления / А.И. Герасимов, И.П. Салтыков // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 5.
8. Дацко Ю.С. Улучшение акустической среды торговых залов за счет применения подвесных потолков из новых материалов / Ю.С. Дацко, О.Г. Тарасова // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: X Всероссийская конференция молодых ученых. – Краснодар, 2017. – С. 1017–1018.

References

1. Analytical Report on the Results of the Analysis of the State of Competition in the Commodity Market of Suspended Ceiling Structures (Systems) // FAS Russia. – URL : https://fas.gov.ru/documents/651405
2. Stetsky S.V. Suspended Ceilings: Function and Aesthetics in the Interiors of Civil Buildings / S.V. Stetsky, K.O. Larionova, T.A. Yakunina // Innovation and Investment. – 2023. – № 2. – P. 184–186.
3. Galyuzhin S.D. Efficiency of Installing Stretch Ceilings in Industrial Buildings of Transport Engineering Enterprises / S.D. Galyuzhin, O.M. Lyubikova // Transport Engineering. – 2022. – № 08(8). – P. 56–66.
4. GOST R ISO 16000-6-2023. Indoor Air. – Part 6. Determination of Volatile Organic Compounds in Indoor and Test Chamber Air by Active Sampling on Sorbent Followed by Thermal Desorption and Gas Chromatography with Mass-Selective Detection. – M. : Russian Institute of Standardization, 2023.
5. Izotov E.A. Drywall. Description and Application in Construction // Science and Education Today. – 2020. – P. 23–24.
6. Zagranichnova L.A. Methodology for Calculating Materials of a Slatted Suspended Ceiling. Design Projects / L.A. Zagranichnova, A.V. Bushmina // New Ideas of the New Century: Proceedings of the International Scientific Conference of the Faculty of Architecture and Design, Pacific National University. – 2017. – P. 226–232.
7. Gerasimov A.I. On the Issue of Using Acoustic Suspended Ceilings with a Low Mounting Height / A.I. Gerasimov, I.P. Saltykov // Engineering Journal of Don. – 2021. – № 5.
8. Datsko Yu.S. Improving the Acoustic Environment of Retail Halls through the Use of Suspended Ceilings Made of New Materials / Yu.S. Datsko, O.G. Tarasova // Scientific Support of the Agro-Industrial Complex: X All-Russian Conference of Young Scientists, Krasnodar. – 2017. – P. 1017–1018.

УДК 692

БЕТОНЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: ГЕОПОЛИМЕРЫ, КАРБОНИЗАЦИЯ, ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ

♦♦♦♦♦

NEW GENERATION CONCRETE: GEOPOLYMERS, CARBONATION, WASTE RECYCLING

Галимзянов Денис Вилович
студент кафедры природообустройства,
строительства и гидравлики,
Башкирский государственный аграрный университет
galimzanovdenis847@gmail.com

Кутлияров Дамир Наилевич
кандидат технических наук,
доцент кафедры природообустройства,
строительства и гидравлики,
Башкирский государственный аграрный университет
kutliarov-d@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются перспективные направления развития бетонных технологий, ориентированные на снижение углеродного следа строительной отрасли. Анализируются два основных подхода: геополимерные вяжущие на основе промышленных отходов (золошлаки) и карбонизационные технологии, позволяющие бетону активно поглощать углекислый газ из атмосферы или промышленных выбросов. Приводятся данные о прочностных характеристиках новых материалов, показателях снижения выбросов CO_2 потенциале улавливания углекислого газа. Обсуждаются экономические и нормативные барьеры внедрения технологий в массовое строительство.

Ключевые слова: геополимерный бетон, карбонизация, улавливание CO_2, бесцементные вяжущие, золошлаковые отходы, низкоуглеродное строительство, щелочная активация, углеродный след, переработка отходов.

Galimzyanov Denis Vilovich
Student of the Department
of Environmental Engineering,
Construction,
Bashkir State Agrarian University
galimzanovdenis847@gmail.com

Kutliarov Damir Nailevich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Environmental Engineering,
Construction,
Bashkir State Agrarian University
kutliarov-d@mail.ru

Annotation. This article examines promising areas for the development of concrete technologies aimed at reducing the carbon footprint of the construction industry. Two main approaches are analyzed: geopolymer binders based on industrial waste (ash and slag) and carbonation technologies, which allow concrete to actively absorb carbon dioxide from the atmosphere or industrial emissions. Data is provided on the strength properties of new materials, CO_2 emission reduction indicators, and the potential for carbon dioxide capture. Economic and regulatory barriers to the implementation of these technologies in mass construction are discussed.

Keywords: geopolymer concrete, carbonation, CO_2 capture, cementless binders, ash waste, low-carbon construction, alkaline activation, carbon footprint, waste recycling.

Цель исследования – изучить современные данные о технологиях бетонов нового поколения и оценить их потенциал для снижения экологической нагрузки от строительной отрасли при сохранении или повышении эксплуатационных характеристик материала.

Основные задачи исследования – анализ механизмов формирования структуры и прочности геополимерных бетонов при использовании различных видов промышленных отходов, оценка количественных показателей снижения выбросов CO_2 при замене традиционного портландцемента на инновационные вяжущие, систематизация данных о прочностных характеристиках новых бетонов в сравнении с традиционными аналогами, изучение технологии карбонизации от улавливания газа до формирования стабильных карбонатов, а также выявление экономических и нормативных барьеров, сдерживающих массовое внедрение этих технологий в России и мире.

Актуальность исследовательской работы.

Производство портландцемента – ключевого компонента традиционного бетона – ежегодно генерирует около 8 % всех мировых выбросов углекислого газа. Причём этот показатель остаётся стабильно высоким с 2019 года, а при годовом объёме производства бетона свыше 20 млрд тонн даже незначительное снижение углеродоёмкости может дать колоссальный экологический эффект. Именно поэтому, в последние годы, активно развиваются два перспективных направления: геополимерные бетоны на основе промышленных отходов и карбонизационные технологии, позволяющие бетону не толькосокращать выбросы, но и активно поглощать углекислый газ.

Геополимерные бетоны представляют собой бесцементные вяжущие, получаемые активацией щёлочью алюмосиликатного сырья – преимущественно промышленных отходов. В отличие от продуктов гидратации традиционных портландцементных бетонов, где основными структурообразующими новообразованиями являются гидросиликаты кальция, в геополимерах микроструктура составлена гидроалюмосиликатами кальция и натрия. Атомы алюминия, встроенные в кристаллическую решётку гидратных новообразований, значительно упрочняют её [1].

Чтобы оценить, как добавкивлияют на прочность геополимерных бетонов, рассмотрим эксперимент с замещением песка гранитной пылью.

В ходе исследований, проведённых с использованием геополимерных смесей на основе золы-уноса с частичной заменой песка гранитной пылью, была установлена чёткая зависимость прочности от содержания добавки. Полученные данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Влияние содержания гранитной пыли на прочность геополимерного бетона

Содержание гранитной пыли, %	Прочность на сжатие, МПа (7 сут)	Прочность на сжатие, МПа (28 сут)	Прочность на сжатие, МПа (90 сут)
0 %	24,17	36,48	43,98
10 %	30,27	39,33	44,08
20 %	31,91	40,20	45,33
30 %	35,75	41,72	45,48
40 %	36,17	42,55	46,08
50 %	29,88	39,68	44,86

Оптимальное замещение песка гранитной пылью составляет 40 %, при котором прочность достигает 46,08 МПа к 90 суткам. Дальнейшее увеличение содержания пыли снижает прочность из-за избытка мелких частиц, нарушающих плотную упаковку заполнителя.

Для сравнительной оценки эффективности геополимерных материалов были изготовлены пять групп образцов. Первая группа – традиционный бетон класса В40 на основе портландцемента, изготовленный по стандартной технологии. Вторая группа – неармированный геополимер – бесцементный состав на основе золошлаковых отходов, активированный щёлочью, без волокнистого армирования. Третья и четвёртая группы – фиброгеополимеры с объёмной долей стальной фибры 1,0 % и 0,5 % соответственно. Пятая группа – гибридный фиброгеополимер с комбинированным армированием (стальная фибра + полипропиленовая фибра).

В качестве сырья для геополимеров были использованы гидроудалённые золошлаковые отходы тепловых электростанций Приморского края. Оптимизация составов при варьировании молярности щелочного активатора (NaOH, 4–8 моль/л) позволила получить материалы, достигающие прочности при сжатии до 67,3 МПа. Результаты сравнительных испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение прочности и углеродного следа геополимерного бетона и традиционного бетона

Наименование материала	Прочность на сжатие, МПа	Относительный углеродный след CO_2, % от бетона)
Традиционный бетон (класс В40)	40,89	100 % (базовый уровень)
Неармированный геополимер	41,33	~60 %
Фиброгеополимер (состав 1, сф = 1 %)	46,67	~55 %
Фиброгеополимер (состав 2, сф = 0,5 %)	45,78	~50 %
Гибридный фиброгеополимер	46,67	~45 %

Геополимерные составы с фибровым армированием демонстрируют прочность на 12–14 % выше, чем традиционный цементобетон того же класса (В40), при одновременном снижении углеродного следа на 40–55 %.

Карбонизация бетона – это химический процесс, в котором углекислый газ вступает в реакцию с гидроксидом кальция (портландитом) и гидросиликатами кальция в цементной матрице, образуя стабильные карбонаты кальция ($CaCO_3$), которые уплотняют структуру материала и повышают его прочность. В естественных условиях этот процесс протекает крайне медленно – на протяжении десятилетий, так как концентрация CO_2 в атмосфере составляет всего 0,04 %. Однако принудительная карбонизация в камерах с высоким давлением и повышенной

концентрацией газа позволяет ускорить реакцию до нескольких часов или суток, одновременно достигая значительного упрочнения материала [2].

Ключевым технологическим параметром является давление CO_2. При повышении давления растворимость углекислого газа в водной фазе пор увеличивается, что ускоряет его диффузию вглубь материала и интенсифицирует реакцию карбонизации. Исследования низкоуглеродного переработанного бетона (LCRC) показывают, что внешнее давление CO_2 является доминирующим фактором, определяющим глубину карбонизации и изменение прочности. Данные представлены в таблице 3 [3].

Таблица 3. – Влияние давления CO_2 на карбонизацию и прочность бетона

Давление CO_2, МПа	Глубина карбонизации, мм	Изменение прочности (% к прочности)	Эффективность
0,1 (атмосферное)	Базовый уровень	Отсутствие изменения (0 %)	Низкая
1,0	10–13	Умеренный прирост (+12 %)	Средняя
3,0	15–17	Заметный прирост (+18 %)	Высокая
5,0	19–21	Значительный прирост (+26 %)	Высокая
7,5	25–28	Наибольший прирост (47 %)	Максимальная

Увеличение давления CO_2 с 0,1 до 7,5 МПа значительно увеличивает глубину карбонизации. Давление возрастает, а прочность повышается до 47 % относительно некарбонизированных образцов. Оно является доминирующим фактором среди исследуемых переменных, что указывает на необходимость использования высоконапорного оборудования для эффективной карбонизации.

Экономическая картина применения геополимерных бетонов складывается из нескольких разнонаправленных факторов. С одной стороны, сырьевая база геополимеров – промышленные отходы – часто доступна по низкой цене или даже требует затрат на утилизацию, что даёт стартовое экономическое преимущество. Однако ключевой компонент технологии – щелочной активатор – остаётся дорогим и энергозатратным в производстве. Исследования показывают, что стоимость геополимерного бетона может составлять от 93 % до 139 % от стоимости традиционного цементобетона в зависимости от рецептуры и региона. При этом существуют успешные примеры снижения затрат: использование базальтовой пыли для частичной замены более дорогого метакаолина позволяет уменьшить стоимость смеси до 60–80 % от исходной, а стоимость получения 1 МПа прочности снижается более чем вдвое. Особые надежды связывают с разработкой активаторов из биомассы и сельскохозяйственных отходов. Такой подход позволяет сократить выбросы парниковых газов по сравнению с коммерческими силикатами, хотя общая стоимость геополимерного бетона пока остаётся выше, чем у бетона на портландцементе.

Карбонизация позволяет упрочнять бетон, снижая содержание цемента до 7.5 % и уменьшая выбросы CO_2 на 8 % без потери прочности. Экономическая выгода достигается за счёт экономии на цементе. Однако есть существенное ограничение: процесс требует больших энергозатрат (измельчение отходов, высокое давление, сложное оборудование). Увеличение прочности часто идёт в ущерб экономической эффективности из-за роста энергопотребления.

Вместо того чтобы выбирать что-то одно, выгоднее объединить обе технологии. Если взять переработанный бетон, прошедший карбонизацию, и использовать его как сырьё для геополимеров, это решит сразу две задачи. Во-первых, такой материал частично заменяет дорогие щелочные активаторы, поскольку сам вступает в реакцию с компонентами смеси. Во-вторых, это позволяет повторно использовать строительные отходы, которые обычно вывозят на свалки. В итоге себестоимость снижается, углеродный след сокращается на 40–55 %, а остаточные материалы не уходят в отходы, а возвращаются в производство.

Вывод.

Внедрение бетонов нового поколения требует не только технологических, но и институциональных изменений: разработки нормативной базы, адаптации производственных мощностей и пересмотра критериев экономической эффективности с учётом экстернальных экологических издержек. Однако пилотные проекты, как в России, так и за рубежом подтверждают, что переход к низкоуглеродным бетонным технологиям – это не отдалённая перспектива, а инженерная реальность ближайших лет, способная кардинально снизить экологический след строительной отрасли без потери прочности, долговечности и надёжности конструкций.

Литература

1. Козлов П.Г. Технологическая схема получения геополимерного бетона на основе золошлаковых материалов / П.Г. Козлов, Н.А. Аюбов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2026. – № 2. – С. 152–163.
2. Карбонизация сырьевой смеси и свежеотформованных изделий при производстве бетонной вибропрессованной тротуарной плитки // Строительство и техногенная безопасность. – 2025. – № 3. – С. 43–49.
3. Кутлияров Д.Н. Модель архитектурного пространства города / Д.Н. Кутлияров, А.Н. Кутлияров, В.Б. Рыжов // Наука молодых – инновационному развитию АПК. Материалы XII национальной научно-практической конференции молодых ученых. – БГАУ, 2019. – С. 204–207.
4. Рыжков И.Б. Архитектура, проектирование и организация культурных ландшафтов : учеб. пособие для СПО / И.Б. Рыжков, Д.Н. Кутлияров, А.Ню Кутлияров. – СПб. : Лань, 2021. – 204 с.
5. Анализ устойчивости железобетонных конструкций / Р.С. Сахапов [и др.] // В сборнике: Наука молодых – инновационному развитию АПК. Материалы XV Национальной научно-практической конференции молодых ученых. – БГАУ, 2022. – С. 249–252.

References

1. Kozlov P.G. Process flow for producing geopolymer concrete based on ash and slag materials / P.G. Kozlov, N.A. Ayubov // Bulletin of the School of Engineering, Far Eastern Federal University. – 2026. – № 2. – P. 152–163.
2. Carbonation of the raw material mixture and freshly molded products during the manufacture of vibro-pressed concrete paving slabs // Construction and Technogenic Safety. – 2025. – № 3. – P. 43–49.
3. Kutliyarov D.N. Model of urban architectural space / D.N. Kutliyarov, A.N. Kutliyarov, V.B. Ryzhov // Science by the Young for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex. Proceedings of the XII National Scientific and Practical Conference of Young Scientists. – BSAU, 2019. – P. 204–207.
4. Ryzhkov I.B. Architecture, Design, and Organization of Cultural Landscapes: A Study Guide for Secondary Vocational Education / I.B. Ryzhkov, D.N. Kutliyarov, A.N. Kutliyarov. – SPb. : Lan, 2021. – 204 p.
5. Analysis of the stability of reinforced concrete structures / R.S. Sakhapov [et al.] // In the collection: Science of the Young for the Innovative Development of the Agro-Industrial Complex. Proceedings of the XV National Scientific and Practical Conference of Young Scientists. – BSAU, 2022. – P. 249–252.

УДК 624.012.45.004.69

ПРИМЕРЫ УСИЛЕНИЯ АВАРИЙНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

♦♦♦♦♦

EXAMPLES OF STRENGTHENING EMERGENCY REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Голодкова М.М.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
golodkovamaria@gmail.com

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье систематизированы конструктивные решения, применяемые при восстановлении несущей способности аварийных железобетонных элементов. Рассмотрены железобетонные и стальные обоймы колонн, наращивание сечения балок, устройство разгружающих металлических систем, усиление плит дополнительным армированным слоем и внешнее армирование углеродными композитами. Показано, что выбор способа определяется не только величиной дефицита прочности, но и характером трещинообразования, состоянием бетона и арматуры, возможностью разгружения, требованиями огнестойкости и совместностью деформаций существующей и новой частей конструкции. Приведены расчетно-технологические примеры для типичных аварийных ситуаций: разрушения защитного слоя и коррозии продольной арматуры колонны, развития наклонных трещин в приопорной зоне ригеля, недостаточной несущей способности плиты и локального продавливания у колонны. Сформулирована последовательность работ от временного закрепления и обследования до приемочного контроля. Сделан вывод о необходимости проектировать усиление как единую систему, включающую аварийные мероприятия, подготовку контактных поверхностей, передачу усилий и последующий мониторинг.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, аварийное состояние, усиление, обойма, наращивание сечения, внешнее армирование, углеродный композит, трещины, коррозия арматуры, восстановление несущей способности.

Golodkova M.M.
Student in group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
golodkovamaria@gmail.com

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. The article systematizes structural solutions used to restore the load-bearing capacity of emergency reinforced concrete elements. Reinforced concrete and steel jackets for columns, beam section enlargement, installation of unloading steel systems, strengthening of slabs with an additional reinforced layer, and external reinforcement with carbon-fiber composites are considered. It is shown that the choice of strengthening method is determined not only by the magnitude of the strength deficit, but also by the nature of cracking, the condition of concrete and reinforcement, the possibility of unloading, fire-resistance requirements, and deformation compatibility between the existing and new parts of the structure. Design and technological examples are given for typical emergency situations: deterioration of the protective concrete cover and corrosion of longitudinal column reinforcement, development of diagonal cracks in the support zone of a beam, insufficient load-bearing capacity of a slab, and local punching shear failure near a column. The sequence of work is formulated from temporary shoring and inspection to acceptance control. It is concluded that strengthening should be designed as an integrated system that includes emergency measures, preparation of contact surfaces, force transfer, and subsequent monitoring.

Keywords: reinforced concrete structures, emergency condition, strengthening, jacket, section enlargement, external reinforcement, carbon-fiber composite, cracks, reinforcement corrosion, restoration of load-bearing capacity.

Железобетонные конструкции в аварийном состоянии отличаются наличием повреждений и деформаций, свидетельствующих об исчерпании либо опасном приближении к предельной несущей способности. К таким признакам относятся быстро раскрывающиеся трещины, раздробление бетона сжатой зоны, потеря устойчивости продольной арматуры, чрезмерные прогибы, смещения опорных узлов и интенсивная коррозия рабочих стержней. Согласно действующим правилам обследования, обнаружение признаков аварийности требует немедленного ограничения доступа, снижения нагрузок и устройства временных креп-

лений; постоянное усиление назначается только после установления причин повреждений и выполнения поверочного расчета [1, 2].

Цель настоящей работы – обобщить наиболее характерные примеры усиления аварийных железобетонных конструкций и показать взаимосвязь между диагностированным механизмом разрушения, расчетной схемой и технологией выполнения работ.

Исходные положения проектирования усиления. Работа с аварийным объектом начинается не с выбора материала усиления, а со стабилизации расчетной схемы. Временные стойки, подкосы, стяжки или разгружающие фермы устанавливают по специально разработанному проекту производства работ. Последовательность монтажа должна исключать ударное приложение усилий и перераспределение нагрузки на соседние элементы, состояние которых не подтверждено расчетом. При риске хрупкого разрушения разгружение выполняют поэтапно с инструментальным контролем перемещений и раскрытия трещин [1, 3].

Обследование включает фиксацию геометрии и дефектов, определение фактической прочности бетона, расположения и диаметра арматуры, глубины карбонизации, степени коррозии и состояния опорных зон. В расчетной модели учитывают фактические размеры, снижение площади арматуры, повреждение сцепления и изменившуюся жесткость элемента. Проектное решение проверяют по предельным состояниям первой и второй групп, а также на местные эффекты: продавливание, отрыв защитного слоя, анкеровку добавленной арматуры и контактный сдвиг между старым и новым бетоном [2–4].

Таблица 1 – Соответствие аварийных признаков и способов усиления

Аварийный признак	Вероятный механизм	Предпочтительное решение	Ключевой контроль
Вертикальные трещины, отслоение бетона колонны	Коррозия арматуры, недостаток поперечного армирования	Железобетонная либо стальная обойма	Обжатие ядра, анкеровка, контакт
Наклонные трещины у опоры балки	Недостаточная прочность по поперечной силе	Замкнутые хомуты, обойма, композитные U-ламели	Анкеровка за трещиной, отрыв покрытия
Широкие нормальные трещины и прогиб	Дефицит изгибной прочности или жесткости	Наращивание сечения, внешняя арматура, подведение балки	Совместность деформаций, прогиб
Радиальные трещины плиты у колонны	Продавливание	Капитель, стальная траверса, поперечные анкеры	Периметр продавливания, местный контакт
Локальное разрушение после удара/пожара	Потеря сечения и свойств материалов	Замена поврежденной зоны с разгрузкой; обойма	Граница удаления, прочность ремонтного состава

Пример 1. Усиление аварийной колонны железобетонной обоймой. Рассмотрим колонну первого этажа, у которой вследствие длительного увлажнения разрушен защитный слой, на продольных стержнях обнаружена коррозия, а в приопорной зоне – продольные трещины. Поверочный расчет с учетом фактической площади арматуры показывает недостаточную несущую способность при внецентренном сжатии. В этом случае целесообразна четырехсторонняя железобетонная обойма, поскольку она одновременно увеличивает площадь сжатого бетона, добавляет продольную арматуру и создает поперечное обжатие поврежденного ядра.

До начала работ перекрытия разгружают временными стойками, усилие в которых задают ступенчато. Непрочный бетон удаляют до плотного основания, продукты коррозии снимают механически, арматуру очищают и при подтвержденной потере площади дополняют новыми стержнями. Поверхность старого бетона делают шероховатой, очищают и увлажняют; для передачи сдвига предусматривают анкеры или шпонки. Новые продольные стержни соединяют с фундаментом и вышележащим узлом анкеровкой, а замкнутые хомуты устанавливают с учащенным шагом в концевых зонах. Обойму бетонируют мелкозернистой подвижной смесью либо безусадочным составом, обеспечивая полное заполнение пространства [3, 5].

Расчет усиленной колонны выполняют как составного элемента с учетом различий в прочности и деформациях старого и нового бетона. Если надежность контакта подтверждена конструктивными мерами и расчетом, учитывают совместную работу сечений; при сомнительном сцеплении действие обоймы рассматривают более консервативно. Эффективность решения зависит от замыкания поперечного армирования: отдельные накладки на гранях без надежной связи не создают требуемого объемного обжатия. После набора проектной прочности нагрузку с временных стоек передают плавно, одновременно контролируя деформации колонны.

Пример 2. Усиление ригеля с наклонными трещинами. В приопорной зоне аварийного ригеля раскрылись наклонные трещины, пересекающие стенку от опоры к зоне приложения со-

средоточенной нагрузки. Такой рисунок повреждений указывает на опасность разрушения по поперечной силе. Простое инъектирование трещин восстанавливает сплошность бетона, но не устраняет расчетный дефицит поперечного армирования. Поэтому усиление должно пересекать вероятную наклонную трещину и быть надежно закреплено по обе стороны от нее.

При доступе ко всем граням применяют стальную обойму или дополнительные замкнутые хомуты. Поперечные планки прижимают к боковым поверхностям, объединяют с нижними и верхними элементами обоймы и включают в работу затяжкой болтов либо сваркой по проектной последовательности. При доступе только снизу и с боков возможны U-образные углеродные ленты. Основание выравнивают, острые углы скругляют, трещины и раковины ремонтируют, затем наклеивают ленты поперек оси балки. Свободные концы закрепляют в сжатой зоне анкерами, дополнительными продольными полосами или механическими устройствами, поскольку преждевременное отслоение композита ограничивает расчетный эффект [6, 7].

Пример 3. Усиление плиты перекрытия. Для плиты с недостаточной изгибной прочностью и развитыми трещинами в растянутой зоне выбор решения зависит от возможности доступа и требований к прогибу. Наклейка углеродных ламелей или тканей по нижней поверхности дает малую добавочную массу и практически не уменьшает высоту помещения. Композит ориентируют вдоль направления главных растягивающих усилий, а требуемую площадь определяют расчетом усиленного сечения. Основание должно обладать достаточной прочностью на отрыв; слабый защитный слой удаляют и восстанавливают ремонтным составом. Композитное усиление защищают от огня, ультрафиолета и механических повреждений в соответствии с условиями эксплуатации [6–8].

При аварийных радиальных трещинах вокруг колонны рассматривают продавливание. Одним из решений является устройство железобетонной капители, увеличивающей рабочую высоту и расчетный периметр; другим – монтаж стальной траверсы или системы поперечных анкеров. Новые элементы должны быть расположены так, чтобы пересечь потенциальную поверхность продавливания. Перед сверлением контролируют положение существующей арматуры, а усилия при затяжке анкеров ограничивают во избежание локального раздробления бетона. Усиление только нижней поверхности продольными композитными полосами не заменяет проверку на продавливание.

Пример 4. Разгружающая металлическая система. При значительной потере сечения, неопределенном состоянии бетона после пожара или невозможности надежно закрепить внешнее армирование рационально изменить расчетную схему: подвести под плиту стальные балки, установить подкосы к колонне или смонтировать независимую раму. Новый элемент проектируют с понятным путем передачи нагрузки на исправные опоры и фундамент. Контакт с существующей конструкцией заполняют безусадочным раствором; включение обеспечивают клиньями, домкратами или регулируемыми опорами.

Технологическая последовательность и контроль качества. Независимо от выбранного способа проект усиления должен содержать очередность операций, условия допустимой нагрузки, требования к материалам, схемы временного крепления и контрольные точки. Особенно важны операции, которые становятся скрытыми: качество очистки арматуры, глубина удаления слабого бетона, шероховатость контакта, расположение анкеров, фактический шаг хомутов и заполнение зазоров. Их фиксируют актами освидетельствования и фотографиями до бетонирования или закрытия отделочными слоями [3, 5].

Таблица 2 – Сравнение распространенных методов усиления

Метод	Основной эффект	Ограничения	Рациональная область
Железобетонная обойма	Рост площади, жесткости и обжатия	Мокрые процессы, масса, увеличение габарита	Колонны, пилоны, локальные участки
Стальная обойма	Быстрое восприятие усилий	Коррозия, огнезащита, сложные узлы	Аварийные колонны и балки
Наращивание сечения	Рост прочности и жесткости	Требует контакта и разгружения	Балки, плиты, стены
Композитное армирование	Высокая удельная прочность, малая масса	Отрыв, температура, огонь, слабое основание	Изгиб и поперечная сила при исправном бетоне
Подведение элементов	Изменение схемы и разгружение	Новые реакции, уменьшение пространства	Сильно поврежденные элементы

Выбор рационального решения. Сопоставление способов показывает, что универсального метода усиления не существует. Железобетонная обойма эффективна при необходимости существенно повысить несущую способность и восстановить поврежденное сечение, но требует времени на твердение и увеличивает массу. Стальная обойма быстрее включается в работу, зато нуждается в расчетных узлах передачи усилий и защите. Композитные материалы удобны при ограничении массы и габаритов, однако требуют прочного сухого основания и специальных

мер анкеровки и огнезащиты. Подведение независимых элементов предпочтительно, когда состояние существующего бетона не позволяет надежно использовать сцепление.

Таким образом, усиление аварийных железобетонных конструкций представляет собой комплекс расчетных, конструктивных и технологических мероприятий. Его результативность определяется правильным распознаванием механизма разрушения и созданием надежного пути передачи усилий от поврежденного элемента к усилению и далее к опорам. Рассмотренные примеры показывают: колонны с коррозионным разрушением рационально охватывать замкнутыми обоймами; ригели с наклонными трещинами усиливать элементами, пересекающими потенциальную трещину; для плит выбирать между внешним армированием, наращиванием и изменением схемы; при продавливании воздействовать непосредственно на критическую зону.

Обязательными условиями остаются предварительное закрепление, поверочный расчет по фактическим характеристикам, учет стадийности нагружения, контроль скрытых работ и мониторинг после ввода в эксплуатацию. Локальный ремонт трещин либо защитного слоя без устранения причины аварийности не может рассматриваться как полноценное усиление.

Литература

1. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : Российский институт стандартизации, 2024.
2. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М. : Минстрой России, 2018. (с изм.).
3. СП 349.1325800.2017. Конструкции бетонные и железобетонные. Правила ремонта и усиления. – М. : Минстрой России, 2018.
4. Бондаренко В.М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона / В.М. Бондаренко, В.И. Колчунов. – М. : АСВ, 2004. – 472 с.
5. ГОСТ Р 59152-2020. Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям и системам сцепления. – М. : Стандартинформ, 2020.
6. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – М. : Минстрой России, 2015 (с изм. № 1).
7. ГОСТ Р 70762-2023. Внешнее армирование композитными материалами из углеродных волокон. Требования к производству работ и контроль качества. – М. : Российский институт стандартизации, 2023.
8. ACI 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. – Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2017.
9. fib Bulletin 90. Externally Applied FRP Reinforcement for Concrete Structures. – Lausanne : International Federation for Structural Concrete, 2019.
10. Карапетов Э.С. Усиление и реконструкция зданий и сооружений. – СПб. : Издательство АСВ, 2012. – 204 с.

References

1. GOST 31937-2024. Buildings and structures. Rules for inspection and monitoring of technical condition. – M. : Russian Institute for Standardization, 2024.
2. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated edition of SNiP 52-01-2003. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018 (as amended).
3. SP 349.1325800.2017. Concrete and reinforced concrete structures. Rules for repair and strengthening. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
4. Bondarenko V.M. Computational models of force resistance of reinforced concrete / V.M. Bondarenko, V.I. Kolchunov. – M. : ASV, 2004. – 472 p.
5. GOST R 59152-2020. Materials and systems for protection and repair of concrete structures. Requirements for repair mixes and bonding systems. – M. : Standartinform, 2020.
6. SP 164.1325800.2014. Strengthening of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2015 (as amended, № 1).
7. GOST R 70762-2023. External reinforcement with carbon-fiber composite materials. Requirements for execution of works and quality control. – M. : Russian Institute for Standardization, 2023.
8. ACI 440.2R-17. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. – Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, 2017.
9. fib Bulletin 90. Externally Applied FRP Reinforcement for Concrete Structures. – Lausanne : International Federation for Structural Concrete, 2019.
10. Karapetov E.S. Strengthening and reconstruction of buildings and structures. – SPb. : ASV Publishing House, 2012. – 204 p.

УДК 624.012.45:551.583

ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ

♦♦♦♦♦

EFFECT OF GLOBAL WARMING ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Голодкова М.М.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
golodkovamaria@gmail.com

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено влияние глобального потепления на долговечность и эксплуатационную надёжность железобетонных конструкций. Анализ выполнен через изменение климатических воздействий, определяющих перенос веществ и развитие повреждений: температуры, относительной влажности, концентрации углекислого газа, интенсивности осадков, продолжительности увлажнения, уровня моря и солевого аэрозоля. Показано, что потепление действует не как самостоятельная нагрузка, а как фактор, изменяющий скорость карбонизации, проникновения хлоридов, электрохимической коррозии арматуры, усадки, ползучести и температурного трещинообразования. Предложена причинная схема перехода от климатического воздействия к снижению ресурса конструкции. На условном расчётном примере показана чувствительность времени достижения арматуры фронтом карбонизации к изменению коэффициента карбонизации. Систематизированы уязвимые зоны сооружений и меры адаптации. Сделан вывод о необходимости перехода от предположения о неизменном климате к региональной оценке нестационарных воздействий. Направление изменения риска неодинаково для разных территорий и определяется сочетанием температуры, влажности, микроклимата поверхности и качества защитного слоя.

Ключевые слова: глобальное потепление, железобетонные конструкции, климатические воздействия, карбонизация, хлориды, коррозия арматуры, долговечность, срок службы, адаптация, мониторинг.

Golodkova M.M.
Student in group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
golodkovamaria@gmail.com

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. The article examines how global warming affects the durability and service reliability of reinforced concrete structures. The analysis focuses on climate variables that govern transport processes and deterioration: temperature, relative humidity, atmospheric carbon dioxide, precipitation intensity, duration of wetness, sea level, and saline aerosol exposure. Warming does not act as an isolated load; it modifies the rates of carbonation, chloride ingress, electrochemical reinforcement corrosion, shrinkage, creep, and thermally induced cracking. A causal scheme links climatic exposure with loss of structural service life. An illustrative calculation demonstrates how the time required for the carbonation front to reach reinforcement changes with the carbonation coefficient. Vulnerable structural zones and adaptation measures are systematized. Durability assessment should replace the assumption of a stationary climate with regional analysis of nonstationary exposure. The direction of risk change varies by location because it depends on temperature, humidity, surface microclimate, and concrete-cover quality.

Keywords: global warming, reinforced concrete structures, climate exposure, carbonation, chlorides, reinforcement corrosion, durability, service life, adaptation, monitoring.

По данным Шестого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата, средняя глобальная температура поверхности в 2011–2020 гг. была примерно на 1,1 °C выше уровня 1850–1900 гг. [1]. Для железобетона это изменение важно не только из-за абсолютной температуры. Одновременно меняются влажность, режим осадков, продолжительность сухих периодов, частота экстремальной жары, уровень моря и характеристики прибрежного аэрозоля. Эти параметры задают граничные условия для переноса тепла, влаги, CO_2 и хлоридов в защитном слое.

Цель работы – установить основные механизмы влияния глобального потепления на железобетонные конструкции и сформулировать принципы адаптации проектных и эксплуатационных решений. В работе разграничены климатический фактор, физико-химический процесс и конструктивное последствие, поскольку прямая связь между повышением средней температуры и повреждением элемента без учёта влажности и экспозиции может привести к неверной оценке.

Нестационарность климатических воздействий. Традиционный расчёт долговечности часто использует постоянные средние значения температуры и влажности. При изменяющемся климате эти параметры становятся функциями времени. Важна и последовательность событий: длительное высушивание увеличивает последующее капиллярное всасывание, а ливень после жаркого периода создаёт резкий температурно-влажностный градиент. Климатические данные поэтому необходимо пересчитывать к микроклимату конкретной поверхности.



Рисунок 1 – Цепочка воздействия глобального потепления на железобетонную конструкцию
(разработано авторами)

Рисунок 1 показывает, что один климатический сигнал запускает несколько процессов, а повреждение формируется под их совместным действием. Рост температуры ускоряет диффузию и реакции, но уменьшение влажности может ограничить электрохимическую коррозию. Продолжительное увлажнение облегчает перенос ионов, тогда как полное насыщение снижает доступ кислорода. В исследовании E. Bastidas-Arteaga и соавторов местные условия внутри одного района изменяли расчётную глубину карбонизации до 19 %, а нескорректированные климатические данные заметно искажали время начала коррозии [8].

Таблица 1 – Связь климатических факторов с повреждением железобетона

Климатический фактор	Изменяемый процесс	Вероятное проявление	Условия максимального риска
Повышение температуры	Диффузия, скорость реакций, испарение, ползучесть	Ускорение карбонизации и коррозии; температурные деформации	Влажность, достаточная для реакций; массивные или протяжённые элементы
Изменение влажности и осадков	Насыщение пор, капиллярный перенос, циклы сушки	Трещины, перенос солей, коррозия, выщелачивание	Открытые горизонтальные поверхности и зоны плохого водоотвода
Рост концентрации CO_2	Карбонизация цементного камня	Снижение pH и депассивация арматуры	Тонкий или пористый защитный слой; умеренная влажность
Подъём моря и штормовой нагон	Хлоридное насыщение и эрозионное воздействие	Питтинговая коррозия, отслоение защитного слоя	Прибрежные опоры, причалы, мосты, брызговая зона
Экстремальная жара и пожары	Термические градиенты, дегидратация, потеря сцепления	Сколы, раскрытие трещин, снижение жёсткости	Высокая скорость нагрева, влажный плотный бетон, недостаточная огнезащита

Карбонизация и начало коррозии. CO_2 диффундирует в ненасыщенную поровую систему и реагирует со щелочными компонентами цементного камня. После достижения арматуры фронтом пониженной щёлочности пассивное состояние стали нарушается. Температура влияет на перенос и реакции, концентрация CO_2 задаёт внешнюю движущую силу, а влажность – доступность газовой фазы и воды. Расчёты S. Talukdar и N. Banthia показали, что изменяющийся климат способен увеличить глубину карбонизации и сократить период до коррозионного растрескивания [7]. Региональные модели подтверждают зависимость результата от сценария и пространственного разрешения данных [8].

Для рисунка 2 использована распространённая квадратно-корневая зависимость глубины карбонизации от времени. При условном увеличении коэффициента с 3,5 до 4,2 мм/√год фронт достигает арматуры при защитном слое 35 мм примерно через 69 лет

вместо 100 лет. Пример не задаёт универсальную величину климатического эффекта, он показывает высокую чувствительность срока инициирования коррозии к небольшому изменению интегрального коэффициента. В реальном расчёте коэффициент определяют по составу и влажности бетона, условиям экспозиции, данным обследования и региональному климатическому сценарию.

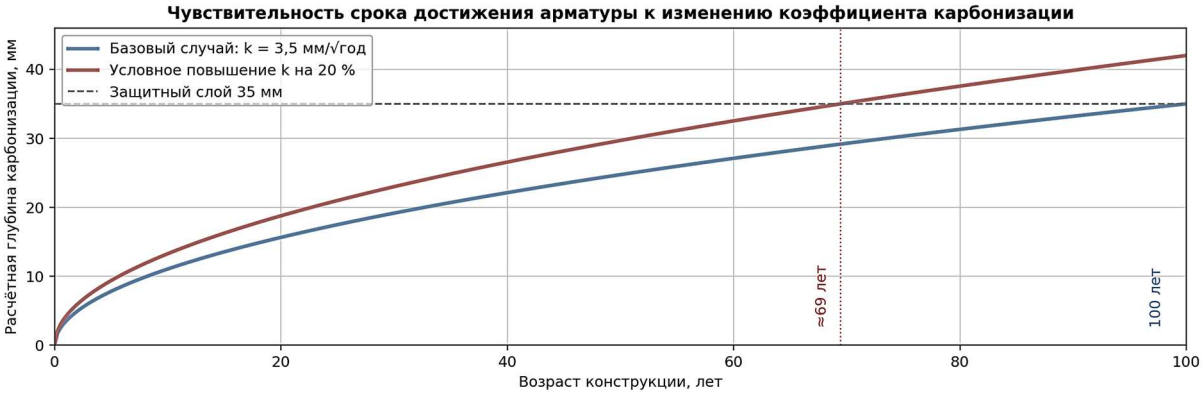


Рисунок 2 – Расчётная иллюстрация влияния коэффициента карбонизации на время достижения защитного слоя 35 мм; значения k условные и не являются прогнозом для конкретного объекта

Хлоридное воздействие и прибрежные сооружения. Температура и влажность влияют на диффузию, поверхностную концентрацию хлоридов и продолжительность влажного состояния. Подъём моря и штормовые нагоны расширяют зоны брызгового и аэрозольного воздействия. В расчётах V. Ramani и L. Zhang климатические изменения сокращали среднее время до хлоридной коррозии для Дубая и Кашкайша, но для Тасмании давали противоположный эффект [9]. Уязвимы участки переменного увлажнения, трещины, рабочие швы и зоны с недостаточным защитным слоем.

Температурные деформации, усадка и ползучесть. Волны жары увеличивают перепады температуры поверхности. В протяжённых элементах растут перемещения швов и усилия при стеснённой деформации. Ускоренное высушивание повышает риск усадочных трещин, а длительно повышенная температура меняет скорость ползучести. Эти эффекты особенно важны для предварительно напряжённых конструкций и одновременно создают пути для воды и хлоридов.

Экстремальные события. Ливни и наводнения насыщают бетон, вымывают компоненты и заносят соли; последующее высушивание создаёт градиенты влажности. В прибрежной зоне штормовая нагрузка сочетается с истиранием защитного слоя. Волны жары перегревают опорные части и швы. Поэтому оценка должна охватывать средний климат и сочетания редких событий [2].

Таблица 2 – Меры адаптации железобетонных конструкций к изменяющемуся климату

Стадия	Мера	Контролируемый эффект	Практический критерий
Проектирование	Региональные сценарии температуры, влажности, CO_2, осадков и моря	Уточнение граничных условий модели долговечности	Расчёт нескольких сценариев и анализ чувствительности
Материалы	Низкая проницаемость, ограничение водоцементного отношения, стойкие вяжущие	Замедление карбонизации и переноса хлоридов	Класс бетона, коэффициент миграции, водопоглощение
Конструирование	Увеличение защитного слоя, раскрытие трещин под контролем, водоотвод	Рост пути переноса и уменьшение локального увлажнения	Фактическая толщина слоя, ширина трещин, отсутствие застойных зон
Защита	Гидрофобизация, покрытия, ингибиторы, коррозионностойкая арматура	Снижение поступления воды, CO_2 и хлоридов	Проверяемый эксплуатационный показатель и срок обновления
Эксплуатация	Риск-ориентированные осмотры и инструментальный мониторинг	Раннее выявление ускорения деградации	Тренд глубины карбонизации, хлоридов, потенциала коррозии и трещин

Адаптация существующих объектов. Обследование должно определить толщину и проницаемость защитного слоя, глубину карбонизации, профиль хлоридов, влажность и признаки активной коррозии. По фактическим данным уточняют модель деградации и интервал монито-

ринга. До депассивации эффективны водоотвод и поверхностная защита; после её начала требуется ремонт бетона и арматуры, а при потере сечения – расчёт усиления. Климатический сценарий влияет также на сроки повторного контроля и обновления покрытия.

Нормативные требования задают базовые классы среды, свойства бетона и меры защиты [3–5]. Для ответственных объектов их следует дополнять сценарным расчётом. Неопределённость связана с климатической моделью, микроклиматом, качеством бетона, трещинами и обслуживанием. Решение должно сохранять приемлемый результат в диапазоне обоснованных сценариев.

Таким образом, глобальное потепление меняет условия переноса и скорость деградации железобетона. Практически значимы карбонизация, хлоридная коррозия, циклы увлажнения и высушивания и температурные деформации. Эффект зависит от региона и микроклимата, поэтому локальную модель нельзя заменить единым коэффициентом запаса. Адаптация включает уточнение климатических данных, снижение проницаемости, управление влагой, защиту поверхности и мониторинг состояния.

Литература

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. – Geneva : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. – DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
2. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report. – Cambridge : Cambridge University Press, 2022. – DOI: 10.1017/9781009325844
3. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2018.
4. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с изм. № 1–4). – М. : Минстрой России, 2017–2024.
5. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с изм.). – М. : Минстрой России, 2018.
6. Stewart M.G. Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration / M.G. Stewart, X. Wang, M.N. Nguyen // Engineering Structures. 2011. Vol. 33. – № 4. – P. 1326–1337. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.010
7. Talukdar S. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Development of a service lifespan model / S. Talukdar, N. Banthia // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 40. – P. 775–782. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.026
8. Multi-region lifetime assessment of reinforced concrete structures subjected to carbonation and climate change / E. Bastidas-Arteaga [et al.] // Structures. – 2022. – Vol. 45. – P. 886–899. – DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.061
9. Ramani V. Impacts of climate change on long-term reliability of reinforced concrete structures due to chloride ingress / V. Ramani, L. Zhang // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 354. – Art. 129091. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129091
10. Probabilistic modelling of deterioration of reinforced concrete structures / D.V. Val [et al.] // Structural Safety. – 2025. – Vol. 113. – Art. 102454. – DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102454

References

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. – Geneva : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
2. IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report. – Cambridge : Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844
3. GOST 31384-2017. Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion. General technical requirements. – M. : Standartinform, 2018.
4. SP 28.13330.2017. Protection of building structures against corrosion. Updated edition of SNiP 2.03.11-85 (amendments № 1–4). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2017–2024.
5. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated edition of SNiP 52-01-2003 (as amended). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
6. Stewart M.G. Climate change impact and risks of concrete infrastructure deterioration / M.G. Stewart, X. Wang, M.N. Nguyen // Engineering Structures. – 2011. – № 33(4). – P. 1326–1337. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.01.010

7. Talukdar S. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Development of a service lifespan model / S. Talukdar, N. Banthia // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 40. – P. 775–782. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.026
8. Multi-region lifetime assessment of reinforced concrete structures subjected to carbonation and climate change / E. Bastidas-Arteaga [et al.] // Structures. – 2022. – Vol. 45. – P. 886–899. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.061
9. Ramani V. Impacts of climate change on long-term reliability of reinforced concrete structures due to chloride ingress / V. Ramani, L. Zhang // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 354. Art. 129091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129091
10. Probabilistic modelling of deterioration of reinforced concrete structures / D.V. Val [et al.] // Structural Safety. 2025. Vol. 113. Art. 102454. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102454

УДК 624.012.45:620.197

ЗАЩИТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ОТ КОРРОЗИИ С ПОМОЩЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ КОЛЛОИДНЫХ СИСТЕМ

♦♦♦♦♦

PROTECTION OF REINFORCED CONCRETE PRODUCTS AGAINST CORROSION USING COLLOIDAL SYSTEMS

Голодкова М.М.
студентка гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
golodkovamaria@gmail.com

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрено применение коллоидных систем как средства вторичной защиты железобетонных изделий от проникновения воды, углекислого газа и хлоридов. К таким системам отнесены водные золи кремнезёма, силикатные дисперсии, силановые эмульсии и органо-неорганические составы, формируемые по золь-гель-механизму. Показано, что защитный эффект возникает вследствие совместного действия нескольких процессов: заполнения и сужения капиллярных пор, образования дополнительного гидросиликата кальция, снижения поверхностной энергии стенок пор и формирования тонкого барьерного слоя. Систематизированы области рационального применения коллоидных материалов при заводской и ремонтной обработке железобетона. Предложена последовательность выбора состава с учётом причины коррозии, влажности основания, трещиноватости, паропроницаемости и условий последующей эксплуатации. Приведены оригинальные схемы механизма защиты и технологического контроля, а также таблицы для сопоставления составов и показателей качества. Сделан вывод, что коллоидная обработка не заменяет ремонт дефектного защитного слоя и восстановление арматуры, но при правильно подготовленном основании способна снизить скорость поступления агрессивных компонентов и увеличить продолжительность стадии до начала коррозии.

Ключевые слова: железобетонные изделия, коррозия арматуры, коллоидная система, золь кремнезёма, наносилика, силановая эмульсия, золь-гель-покрытие, гидрофобизация, хлориды, долговечность.

Golodkova M.M.
Student in group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
golodkovamaria@gmail.com

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. The article examines colloidal systems as secondary protection for reinforced concrete products against the ingress of water, carbon dioxide, and chlorides. The systems considered include aqueous silica sols, silicate dispersions, silane emulsions, and organic-inorganic compositions formed through a sol-gel mechanism. Their protective action is associated with several concurrent processes: filling and narrowing capillary pores, producing additional calcium silicate hydrate, lowering the surface energy of pore walls, and forming a thin barrier layer. The rational fields of application of colloidal materials in factory treatment and repair of reinforced concrete are systematized. A selection procedure is proposed that takes into account the cause of corrosion, substrate moisture, cracking, vapor permeability, and future exposure. Original diagrams illustrate the protection mechanism and technological control, while comparative tables summarize material classes and quality indicators. It is concluded that colloidal treatment cannot replace repair of a defective concrete cover or restoration of damaged reinforcement. When the substrate is properly prepared, however, it can reduce the ingress rate of aggressive agents and extend the corrosion-initiation period.

Keywords: reinforced concrete products, reinforcement corrosion, colloidal system, silica sol, nanosilica, silane emulsion, sol-gel coating, hydrophobization, chlorides, durability.

Коррозионная стойкость железобетонного изделия определяется тем, насколько долго защитный слой сохраняет щелочную среду у поверхности арматуры и ограничивает перенос влаги, кислорода, углекислого газа и хлоридов. Карбонизация снижает щёлочность бетона, а накопление хлоридов локально разрушает пассивную плёнку стали. После депассивации продукты коррозии создают растягивающие напряжения в защитном слое, вызывают продольные трещины и отслоения. Нормативная стратегия поэтому сочетает первичную защиту, конструктивные меры и вторичную поверхностную обработку [1–3].

Цель работы состоит в обосновании возможностей коллоидных систем для вторичной защиты железобетонных изделий и в установлении условий, при которых такая обработка дей-

ствительно влияет на транспорт агрессивных компонентов. Основное внимание уделено механизмам, связанным с дисперсным состоянием материала, а не коммерческим наименованиям составов.

Коллоидная система и её отличие от обычного покрытия. Коллоид представляет собой дисперсию частиц нанометрового или субмикронного размера в жидкой среде. Для бетона практический интерес имеют золи SiO_2, силикатные растворы с коллоидной фазой, полимерные латексы и эмульсии органосиланов. После нанесения жидкая фаза переносит дисперсные частицы или реакционноспособные прекурсоры в открытую поровую систему. По мере испарения воды и протекания реакций образуется гель либо тонкая сетчатая фаза, закреплённая на стенках капилляров. В отличие от сплошной плёнки такая обработка может сохранять часть паропроницаемости, однако глубина её действия ограничена размером пор, влажностью и устойчивостью дисперсии.

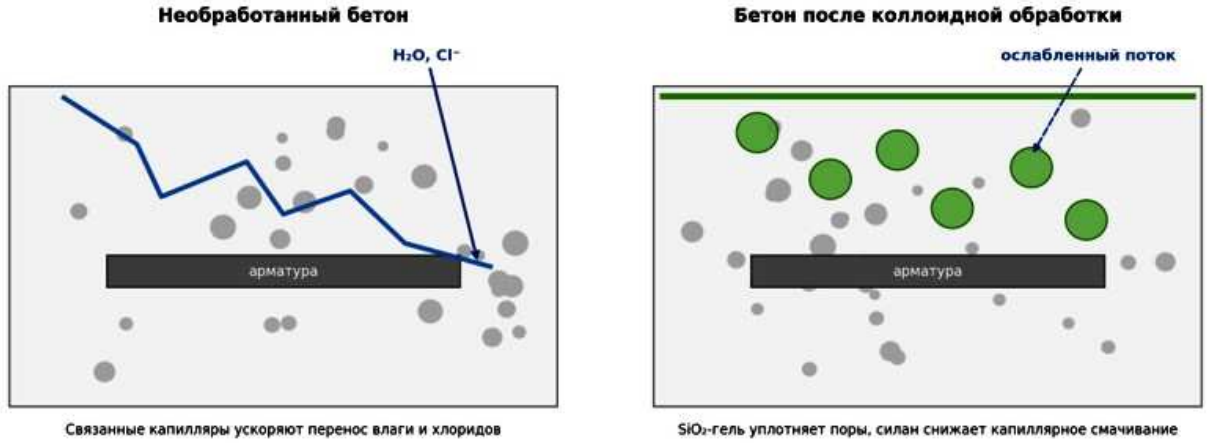


Рисунок 1 – Схема снижения переноса влаги и хлоридов после обработки бетона коллоидной системой (разработано авторами)

На рисунке 1 показаны два взаимодополняющих механизма. Частицы коллоидного кремнезёма и продукты их реакции с гидроксидом кальция уменьшают эффективное сечение связанных капилляров. Органосилановая часть ориентируется на минеральной поверхности и снижает капиллярное всасывание воды. Именно сочетание уплотнения и гидрофобизации объясняет, почему комбинированная система может действовать устойчивее, чем отдельный золь или отдельная эмульсия. В эксперименте Y. Geng и соавторов концентрация хлоридов после обработки составом SiO_2-золь/силановая эмульсия была ниже на 29,6–56,6 % в зависимости от режима испытания, тогда как для одной силановой эмульсии снижение составляло около 14,8 % [7]. Эти результаты относятся к конкретным смесям и не должны переноситься на объект без пробного участка.

Таблица 1 – Виды коллоидных систем и механизм защитного действия

Система	Основной механизм	Рациональное применение	Критические ограничения
Водный золь SiO_2	Заполнение мелких пор, пуццолановая реакция, образование дополнительного C–S–H	Плотные изделия без активных трещин; упрочнение поверхностной зоны	Агрегация частиц, малая глубина проникновения во влажное или очень плотное основание
Коллоидная наносилика + силикат	Уплотнение пор и формирование малорастворимого силикатного геля	Поверхности, где требуется уменьшить водопоглощение и пыление	Риск высолов, необходимость подбора модуля и расхода
Силановая или силоксановая эмульсия	Гидрофобизация стенок капилляров без полного перекрытия пор	Атмосферное и брызговое увлажнение, хлоридные аэрозоли	Не восстанавливает прочность; чувствительна к трещинам и влажности при нанесении
Гибридная золь-гель-система	Неорганическая сетка + органическая гидрофобная фаза; возможное введение ингибитора	Зоны комбинированного воздействия воды, CO_2 и солей	Сложность рецептуры, усадка геля, контроль адгезии и совместимости
Полимерная коллоидная дисперсия	Коалесценция частиц с образованием эластичной барьерной плёнки	Тонкие защитные покрытия и полимерцементные слои	Старение полимера, снижение паропроницаемости, подготовка основания

Физико-химическое взаимодействие с цементным камнем. Аморфный SiO_2 реагирует с портландитом и формирует гидросиликат кальция, сходный по строению с основной связующей фазой цементного камня. Исследования P. Hou и соавторов показали, что для поверхностной обработки коллоидной наносиликой значимы одновременно пуццолановая реакция и эффект наполнения пор [6]. Для прекурсоров типа тетраэтоксисилана сначала протекают гидролиз и конденсация, после чего кремнезёмная сетка образуется непосредственно в поровом пространстве. Эксперимент R. Zarzuela и соавторов подтвердил образование C–S–H при взаимодействии силикатных олигомеров с портландитом [10]. При этом избыток материала на поверхности способен дать хрупкую корку; увеличение расхода не гарантирует пропорционального роста защиты.

Выбор состава по механизму разрушения. При хлоридном воздействии приоритетом служит снижение переноса жидкой влаги и ионов. При карбонизации важны газопроницаемость и стабильность влажностного режима. Если бетон уже имеет раскрытые трещины, пустоты или отслоения, жидкая пропитка не образует непрерывного барьера: дефекты сначала расшивают и заполняют ремонтным составом. При наличии активной коррозии выполняют обследование арматуры и оценивают потерю сечения. Коллоидную систему следует рассматривать как элемент комплекса, а не как способ скрыть повреждения.



Рисунок 2 – Технологическая последовательность применения коллоидной защитной системы (*разработано авторами*)

Таблица 2 – Показатели контроля коллоидной защиты железобетона

Этап	Контролируемый показатель	Метод оценки	Признак неприемлемого результата
До нанесения	Прочность и целостность поверхностного слоя	Осмотр, простукивание, отрыв со скалыванием при необходимости	Отслоения, меление, активные трещины, загрязнение маслами
Пробный участок	Впитывание и фактический расход	Взвешивание материала, наблюдение времени насыщения	Стекание, пятнистость, образование непрочной корки
После выдерживания	Капиллярное водопоглощение	Сравнение с необработанным контрольным участком	Отсутствие устойчивого снижения водопоглощения
Защитный слой	Проницаемость для хлоридов или CO_2	Лабораторные образцы, керны, профиль содержания хлоридов	Несоответствие проектному критерию и высокая вариабельность
Эксплуатация	Трещины, влажностные пятна, потенциал коррозии	Периодические осмотры и инструментальный мониторинг	Возобновление намокания, рост трещин, признаки активной коррозии

Подготовка поверхности определяет повторяемость результата. С бетона удаляют цементное молочко, загрязнения и непрочные участки; трещины и раковины ремонтируют материалами, совместимыми по деформативности. Влажность устанавливают по технической документации выбранного состава: водный золь может требовать умеренно влажного основания, тогда как гидрофобизирующая эмульсия обычно нуждается в сухих капиллярах. На пробном участке фиксируют расход, время впитывания, отсутствие липкой плёнки и изменение внешнего вида. Нанесение выполняют равномерно, без локальных луж и преждевременного высыхания между слоями. Требования к производству и приёмке вторичной защиты должны быть закреплены в технологической карте [3, 4].

Контроль эффективности и долговечности. Одного измерения контактного угла недостаточно: высокий угол смачивания характеризует поверхность, но не показывает глубину проникновения и стойкость при истирании. Для изделий, работающих во влажной или хлоридной сре-

де, сопоставляют капиллярное водопоглощение, электрическое сопротивление бетона, глубину проникновения воды, профиль хлоридов и адгезию покрытия. Повторные измерения после циклов увлажнения, высушивания и замораживания позволяют выявить потерю эффекта. Защитный состав принимают не по факту нанесения, а по достижению заранее заданного эксплуатационного показателя.

Преимуществом коллоидных систем является малая толщина и химическая совместимость кремнезёмной фазы с цементным камнем. Ограничения связаны с неоднородностью реального бетона, старением дисперсии, агрегацией частиц, малой глубиной обработки и зависимостью гидрофобизации от влажности. Для заводских изделий целесообразно включать обработку в стабильный технологический цикл. На эксплуатируемой конструкции необходимы пробные участки, поскольку одинаковый состав по-разному ведёт себя на бетоне с различным водоцементным отношением, возрастом и историей увлажнения.

Таким образом, коллоидная защита железобетона основана на управлении переносом агрессивных компонентов в поверхностной зоне. Наиболее обоснован комбинированный подход, при котором минеральная дисперсия уплотняет поровую структуру, а органосилановая фаза уменьшает капиллярное смачивание. Результат определяется не номинальным содержанием наночастиц, а их устойчивым распределением, проникновением и реакцией с основанием. Для повреждённых изделий обработку применяют после конструктивного ремонта, а её пригодность подтверждают контрольными показателями и последующим мониторингом.

Литература

1. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2018.
2. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с изм. № 1–4). – М. : Минстрой России, 2017–2024.
3. СП 72.13330.2016. Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 3.04.03-85. – М. : Минстрой России, 2016.
4. ISO 16311-4:2014. Maintenance and repair of concrete structures. – Part 4: Execution of repairs. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
5. EN 1504-2:2004. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Part 2: Surface protection systems for concrete. – Brussels : CEN, 2004.
6. Effects and mechanisms of surface treatment of hardened cement-based materials with colloidal nanoSiO_2 and its precursor / P. Hou [et al.] // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 53. – P. 66–73. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.062
7. Effect of SiO_2 Sol/Silane Emulsion in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete / Y. Geng [et al.] // Coatings. – 2020. – Vol. 10. – № 7. – Art. 682. – DOI: 10.3390/coatings10070682.
8. Ethyl silicate for surface treatment of concrete. – Part II: Characteristics and performance / B. Pigino [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2012. – Vol. 34. – P. 313–321. – DOI: 10.1016/j. cemconcomp.2011.11.021
9. Design of CNS-Li_2SiO_3 Permeable Protective Coatings and Effects on Mortar Matrix / X. Li [et al.] // Materials. – 2020. – Vol. 13. – № 7. – Art. 1733. – DOI: 10.3390/ma13071733
10. Producing C–S–H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials / R. Zarzuela [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2020. – Vol. 130. – Art. 106008. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106008

References

1. GOST 31384-2017. Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion. General technical requirements. – M. : Standartinform, 2018.
2. SP 28.13330.2017. Protection of building structures against corrosion. Updated edition of SNiP 2.03.11-85 (amendments № 1–4). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2017–2024.
3. SP 72.13330.2016. Corrosion protection of building structures and facilities. Updated edition of SNiP 3.04.03-85. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2016.
4. ISO 16311-4:2014. Maintenance and repair of concrete structures. – Part 4: Execution of repairs. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
5. EN 1504-2:2004. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. – Part 2: Surface protection systems for concrete. – Brussels : CEN, 2004.

6. Effects and mechanisms of surface treatment of hardened cement-based materials with colloidal nanoSiO_2 and its precursor / P. Hou [et al.] // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 53. – P. 66–73. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.062
7. Effect of SiO_2 Sol/Silane Emulsion in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete / Y. Geng [et al.] // Coatings. 2020. Vol. 10. № 7. Art. 682. DOI: 10.3390/coatings10070682.
8. Ethyl silicate for surface treatment of concrete. – Part II: Characteristics and performance / B. Pigino [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2012. – Vol. 34. – P. 313–321. DOI: 10.1016/j. cemconcomp.2011.11.021
9. Design of CNS-Li_2SiO_3 Permeable Protective Coatings and Effects on Mortar Matrix / X. Li [et al.] // Materials. 2020. Vol. 13. № 7. Art. 1733. DOI: 10.3390/ma13071733
10. Producing C–S–H gel by reaction between silica oligomers and portlandite: A promising approach to repair cementitious materials / R. Zarzuela [et al.] // Cement and Concrete Research. 2020. Vol. 130. Art. 106008. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106008

УДК 72

БАШНЯ ФЕДЕРАЦИЯ – САМЫЙ ВЫСОКИЙ НЕБОСКРЁБ В МОСКВЕ

♦♦♦♦♦

THE FEDERATION TOWER IS THE TALLEST SKYSCRAPER IN MOSCOW

Горохов Иван Александрович
студент,
Курский государственный университет
0909rebus12@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается самый высокий небоскрёб Москвы – Башня Федерации. Как в Москве Сити возводили объект, методы строительства и трудности, с которыми пришлось столкнуться.

Ключевые слова: Башня Федерации, Москва-Сити, небоскрёбы, высотное строительство.

Gorokhov Ivan Alexandrovich
Student,
Kursk State University
0909rebus12@gmail.com

Annotation. This article examines the tallest skyscraper in Moscow – the Federation Tower. It covers the construction of this structure within the Moscow City complex, the building methods employed, and the challenges encountered along the way.

Keywords: Federation Tower, Moscow City, skyscrapers, high-rise construction.

Москва-Сити (рис. 1, б) является главным современным комплексом небоскрёбов в Российской Федерации. Такие объекты в разных странах становятся главнымфинансовым, бизнес-центром в стране. Москва-Сити не осталась в стороне и тоже стала таким важным объектом в России. В каждом бизнес-центре должна быть доминанта (самое высокое здание), чем и стала Башня Федерации. (рис. 1, а).



а) б)

Рисунок 1 – Башня Федерации:
а) две башни отдельно; б) в комплексе «Москва Сити»

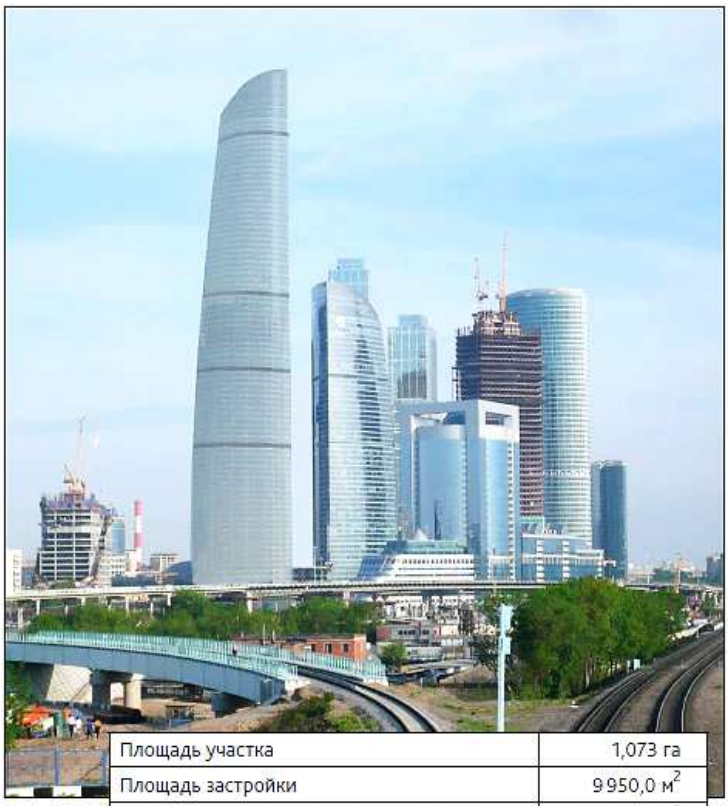
Информация об объекте

Уникальным сооружением является комплекс небоскребов «Федерация», (рис. 2) состоящий из двух трехгранных зданий – башен «Запад» (242 м, 62 этажа) и «Восток» (374 м, 95 этажей). Авторы проекта – российский архитектор С.Э. Чобан и немецкий – П. Швегер (архитектурное бюро SPFECH) (Сонне-Фредериксен, 200632: 31–32) [3]. «Федерация» – комплекс из двух небоскребов, построенный в Москве на 13-м участке Московского международного делового центра.В основу проекта положена концепция вертикального города, которая затем была воплощена в жизнь впервые в истории современной России [10].В 2010 г. на высоте 219 м в башне «Запад» установили электронные часы, по решению международной комиссии они были занесены в Книгу рекордов Гиннесса как единственные, находящиеся на такой высоте. В 2018 г. на 89 этаже открыта смотровая площадка. Башня «Федерация» с 2014 до 2017 г. являлась самым высоким небоскребом Европы. В 2019 г. башня «Федерация» была признана лучшим объ-

ектом недвижимости в мире. Архитектурная команда получила гран-при International Property Awards 2019–2020 гг [3].

Генеральным проектировщиком по инженерным системам и разработчиком рабочей документации монолитного каркаса здания комплекса «Федерация» является проектное бюро «Римакс».

За относительную отметку 0,00 чистого пола первого этажа принята абсолютная отметка +130,10 м [8].



Площадь участка	1,073 га
Площадь застройки	9 950,0 м^2
Общая площадь комплекса «Федерация»	442 915,2 м^2
Общая площадь бункера	10 926,0 м^2
Общая площадь стилобата	98 077,0 м^2

Рисунок 2 – Информация о комплексе «Башни Федерации»

История строительства

Архитектурно-планировочное решение Архитекторы профессор Петер Швегер и Сергей Чобан выиграли конкурс на проектирование комплекса «Федерация», проведенный Внешторгбанком и Mirax Group. Идея построить в «Москва-Сити» уникальное высотное здание не принадлежала заказчикам – высота здания была определена условиями размещения здания на территории «Москва-Сити». Проект комплекса «Федерация» был разработан в Берлине. Высоты башен А и В соотносятся как 2:3. Башни соединены между собой тремя мостами [9].

Проблемы строительства башни Федерации

Многие проекты высотного строительства в России из-за кризиса 2008 года были отменены, а строительство других заморожено. Башня Федерация не осталась в стороне. Строительство было начато в 2003 году и закончилось в 2017. Комплекс из двух небоскрёбов (и впоследствии отменённого шпиля между ними) является высотной доминантой делового квартала Москва-Сити [6–7]. Лишь меньшая из башен была сдана в срок, тогда как строительство другой было несколько раз заморожено. Кроме того, в 2012 году в здании возник пожар, который потребовал привлечения вертолётов [5, 7].

Фундамент

Главной особенностью Башни Федерация в Москве является единая железобетонная плита, на которой размещены сразу два здания – Восток и Запад. Фундамент (рис. 3) состоит из буронабивных свай диаметром 1,5 метров и монолитного ростверка толщиной 6 метров [10–11], а также 25 периметральных колонн, пронизывающих обе башни от фундамента до верхнего этажа [10]. Для фундамента потребовалось 14 тыс. куб. м бетона, что также зафиксировано в Книге рекордов Гиннесса [3].



а) б)

Рисунок 3 – Фундамент:
а) установка стен; б) работы с фундаментом

Фасады

Фасады башен, имеющие сложную геометрическую форму, решены в сплошном остеклении, преимущественно без открывания окон [8]. Между башнями заключена вертикальная стеклянная игла, или «труба», высотой 354 м с антенной наверху (общая высота 448 м), в ней находятся панорамные лифты [9].

Решения по фасадам высотных башен предполагают использование высококачественных витражных стальных конструкций, разработанных и выполняемых ведущими специализированными фирмами. Остекление производится стеклопакетами, рассчитанными на российские условия и имеющими наружное небьющееся стекло типа «триплекс». Витражные конструкции решены без видимых импостов, подчеркивая однородную структуру стеклянных объемов башен.

Стекла, прикрывающие торцы плит перекрытий, выполнены с нанесением полихромной печати с мотивом «небо в облаках». Обслуживание и чистка фасада башни «Восток» осуществляется с помощью телескопического крана.

Верхняя часть башни «Восток», образованная наклонными и вертикальными светопрозрачными конструкциями фасадов, выполнена с учетом увеличения высоты башни. Стеклопакеты наклонного фасада верхней части башни «Восток» выполняются с использованием плоских однокамерных стеклопакетов с электрическим обогревом с системой автоматики, обеспечивающим таяние снега и отсутствие обледенения в зимний период.

Наклонный фасад верхней части башни «Восток» имеет систему сбора и отвода воды с поверхности в форме лотка, который расположен по периметру. В конструкции лотка расположены водоприемные воронки ливневой канализации.

Решения по освещению фасадов предполагают их постоянную подсветку в ночное время и усиленную декоративную подсветку в праздничные дни.

Термическое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций принято для наружных стен высотной части здания 2,69 $м^2 \cdot °С/Вт$, для витражей 0,65 $м^2 \cdot °С/Вт$ [8].

Функциональное зонирование башен «Запад» и «Восток»

В башне «Запад», сданной в эксплуатацию, предусмотрены офисы, расположенные на этажах с 7-го по 32-й и с 35-го по 46-й; апартаменты на этажах с 49-го по 60-й с устройством VIP-апартаментов на 59-м и 60-м этажах. На 60-м и 61-м этажах предусмотрено размещение клуба с фитнес-центром, бассейном и спа. На 62-м этаже располагается ресторан. Этажи 33-й и 34-й, 47-й и 48-й являются сдвоенными техническими этажами. 63-й антресольный этаж представляет собой техническую площадку. Подробно всё находится на разрезе башен (рис. 4) [8].

Подземная часть комплекса

- на –5-м этаже (отметка –19,55 м) – техническое подполье;
- на –4-м этаже (отметка –17,32 м) – два универсальных зала, конференц-залы и обслуживающие их кухни, гардеробные, техническая зона;
- на –3-м этаже (отметка –12,802 м) в центральном атриуме–предприятия общественного питания, прачечная-химчистка, технические помещения;
- на –2-м этаже (отметка –9,342 м) – грузовой двор;
- на –1-м этаже (отметка –5,882 м) – вестибюли, предприятия общественного питания, торговые помещения [8].

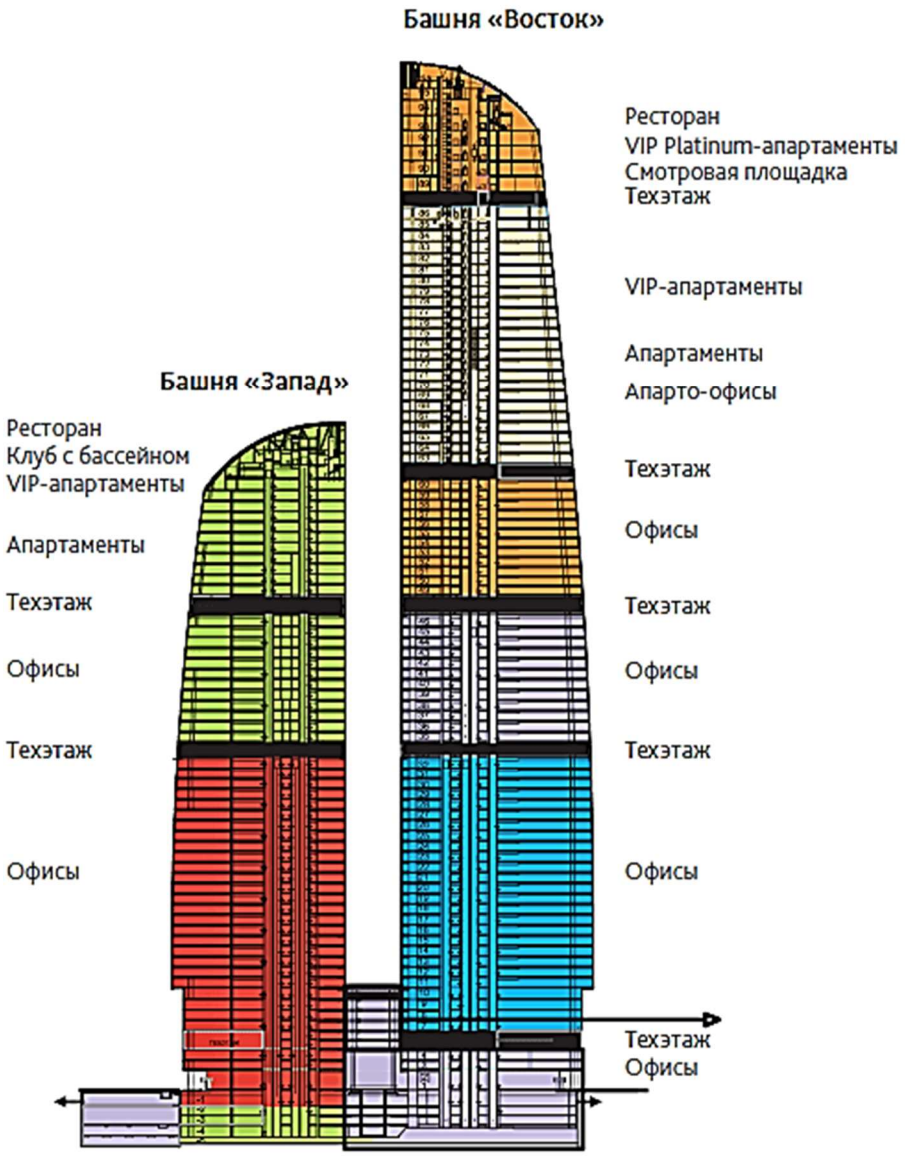


Рисунок 4 –Функциональное зонирование башен

Лифты

Лифты в высотных зданиях – это всегда очень сложное устройство, и при его проектировании приходится обращать особое внимание на многие элементы, которые в обычных многоэтажных зданиях не оказывают особого влияния на комфорт и даже безопасность поездки [8].

Скорость лифтов в «Башне Федерация» достигает 8 метров в секунду. Они позволяют подняться на 93 этаж всего за 55 секунд без пересадок. Такую возможность обеспечивает самая высокая лифтовая шахта в Европе [11].

В комплексе «Башня Федерации» все лифты работают по принципу Twin (с двумя независимыми кабинами в одной шахте).

Twin. Главным отличием этой системы от более распространенной Double-Deck является то, что лифтовые кабины перемещаются в единой лифтовой шахте независимо друг от друга. Это позволяет более гибко обслуживать этажи здания при той же самой площади шахты. Каждая кабина действует по своей кинематической схеме, имеет собственный противовес.

В башнях «Восток» и «Запад» имеются по два грузовых лифта, используемых для обеспечения работы предприятий питания и подъема пожарных подразделений. Кроме того, в подземных этажах для транспортировки пожарных подразделений предусмотрен отдельный лифт.[8].

Общее описание и особенности размещения инженерного оборудования

Башни разделены на противопожарные отсеки техническими этажами. Каждый технический этаж функционально состоит из двух этажей, т.е. является двухэтажным. На техническом этаже размещаются индивидуальные тепловые пункты (ИТП) и индивидуальные холодильные

пункты (ИХП), а также другое инженерное оборудование, которое обслуживает два противопожарных отсека: верхнюю зону нижнего отсека и нижнюю зону, соответственно, верхнего отсека. Такое решение применено как в башне «Запад», так и в башне «Восток».

Каждый технический этаж представляет из себя самостоятельный инженерный блок. Он может состоять из трансформаторных подстанций, из насосного пожарного водопровода, из насосного хозяйственно-питьевого водопровода, из вентиляционных установок, которые обслуживают различные противопожарные отсеки вверх и вниз, из двух индивидуальных тепловых пунктов, один из которых работает на кондиционеры, а второй на отопление, из индивидуального холодильного блока, из насосных групп отопления, теплоснабжения, ГВС и холодоснабжения [8]. Все важные функции дублируются и применяется принцип резервирования – по два независимых источника теплоснабжения и водоснабжения, размещенные на технических этажах. Все инженерное оборудование в «Башне Федерация» западных производителей – Европа и США [11].

По периметру технических этажей размещены вентиляционные камеры с вентиляционными установками, которые работают или на приток, или на вытяжку. Для исключения попадания вытяжного воздуха в приточный воздухозаборные и вытяжные устройства разнесены по разным фасадам. Все технические этажи обеих башен обрамлены фасадной решеткой.

В стилобатной части на 5-м этаже размещается центральный тепловой пункт (ЦТП), который обеспечивает централизованное теплоснабжение обеих башен, «Восток» и «Запад». Там также находится центральная холодильная станция, которая тоже работает на обе башни (рис. 5).

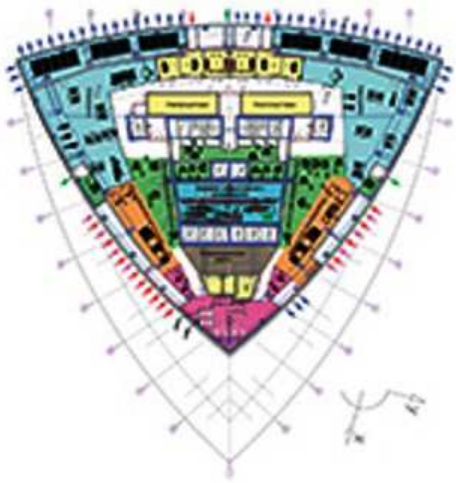


Рисунок 5 – Обобщенная функциональная схема по автоматизированному дистанционному снятию показаний счетчиков электроэнергии

По высоте башни «Восток», в ядре здания, проходят все магистральные трубопроводы из центрального теплового пункта. Башня условно разделена на две части по высоте. До 47-го этажа располагается первая зона подъема магистральных трубопроводов теплоснабжения. На 47-м этаже размещается второй подъемный индивидуальный тепловой пункт (ИТП), который передает воду на верхние этажи. Подъемный тепловой пункт необходим для того, чтобы разделить статические зоны на две части. Там же расположен и подъемный индивидуальный холодильный пункт (ИХП), который передает всю нагрузку на промежуточные технические этажи, расположенные выше 47-го. На этих технических этажах размещаются свои промежуточные тепловые пункты.

Аналогичным образом организовано и холодоснабжение. Так же, в соответствии с таким же зонированием, размещаются приточные и вытяжные системы вентиляции.

Теплоизбытки в верхней зоне башни, с 89-го по 95-й этажи превышают расчетную мощность холодильного центра. Это связано с архитектурными особенностями башни: наклоном кровли и большой площадью остекления. Кроме того, холодоноситель, который идет через промежуточный холодильный пункт, приходит на верхний технический этаж уже достаточно отепленным, с температурой +12 °С. Подобрать фэнкойлы под такую нагрузку оказалось достаточно сложно.

В связи с этим для обеспечения комфортных параметров помещений верхних зон было принято решение об устройстве холодильного центра, который обслуживает этажи с 89-го по 95-й. Этот холодильный центр размещается на 87-м и 88-м технических этажах. В холодильном центре располагаются две холодильные машины суммарной холодильной нагрузкой в 2,5 мВт.

Холодильный центр размещен на 87-м и 88-м технических этажах, а конденсаторные блоки установлены за фасадной решеткой. В вытяжных венткамерах этих этажей смонтированы выносные конденсаторные блоки, использующие для охлаждения вытяжной воздух помещений вместо наружного. Это повышает энергоэффективность системы и сокращает площадь фасадной решетки.

Для ГВС вода проходит через промежуточные тепловые пункты, что приводит к потерям температуры на теплообменниках. В переходный период при температуре подачи +70 °С и обратной воды +30 °С возникает дефицит мощности на верхних этажах. Компенсируется это электронагревателями и накопительными баками. На верхних этажах в летний период для догрева воды используется тепловой насос, забирающий сбросное тепло от холодильного центра, что снижает общее энергопотребление [8].

Подводя итог можно сказать, что Башня Федерация стала главной доминантой современного комплекса небоскрёбов «Москва-Сити». Несмотря на множество проблем во время строительства и долгого возведения объектов, она стала архитектурной композиции, наивысшей точки ансамбля, одного из главных лендмарков города. Благодаря архитекторам С.Э. Чобан и немецкий – П. Швегерстали обладателями престижных наград, включая звание лучшего объекта недвижимости и высотного жилого здания в мире по версии International Property Awards 2019, а также завоевав шесть наград European Property Awards в различных номинациях, среди которых «Лучший многофункциональный комплекс Москвы» и «Лучшая архитектура жилого высотного комплекса» [11].

Литература

1. Башня Федерация / Небоскреб без компромиссов. – URL : https://fedtower.ru/about (дата обращения 27.07.2026).
2. Башня «Федерация» / СПИЧ. – URL : https://www.speech.su/ru/projects/bashnja-federatsija (дата обращения 27.07.2026).
3. Ефремова М.Г. Московский международный деловой центр «Москва-Сити» – инновационный проект XXI в.: 30 лет строительства (1991–2021) // Общество: философия, история, культура. – 2021. – № 12(92). – С. 114–120. – DOI 10.24158/fik.2021.12.18. – EDN LUHQAR (дата обращения 27.07.2026).
4. Журавлёв А.М. Москва-Сити обретает реальные черты // Архитектура и строительство Москвы. – 2003. – Т. 507. – № 1. – С. 39–43.
5. Исаков А.И. Высотное строительство в России // Синергия Наук. – 2016. – № 6. – С. 442–458. – EDN XEQPXD (дата обращения 27.07.2026).
6. Проблемы строительства высотных зданий в крупных городах России / Т.В. Макарова [и др.] // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. – 2012. – № 1. – С. 145–149.
7. Пожар на башне «Восток» комплекса «Федерация». Систем. требования: Internet Explorer. – URL : http://positiverussia.com/news/2012/04/03/Pozhar-na-bashne-Vostok-kompleksa-Federaciya (дата посещения 26.11.2016).
8. Смирнова И.Н. Высотный комплекс «Башня Федерация» / И.Н. Смирнова, Н.В. Шилкин // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2015. – № 4. – С. 20–31. – EDN TTTTET (дата обращения 27.07.2026).
9. Сонне-Фредериксен М. Статьи. Комплекс «Федерация». – URL : http://www.archjournal.ru (дата обращения 27.07.2026).
10. Ткаченко Е.Д. Конструктивные особенности небоскребов (Башня Федерация, Лахта-центр, Тайбэй 101) / Е.Д. Ткаченко, Ю.А. Гурьева // Сборник трудов международной молодёжной школы «Инженерия – XXI», Новороссийск, 15–18 апреля 2025 года. – Новороссийск : Белгородский государственный (дата обращения 27.07.2026) технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 55–56. – EDN THKGXR
11. Шилкин Н. Комплекс «Федерация». Инженерные решения башни «Восток» / Н. Шилкин, И. Смирнова, М. Ефремов // Здания высоких технологий. – 2016. – № 2. – С. 32–33.

References

1. Federation Tower / A Skyscraper Without Compromise. – URL : https://fedtower.ru/about (adate of application 27.07.2026).
2. Federation Tower / SPEECH. – URL : https://www.speech.su/ru/projects/bashnja-federatsija (date of application 27.07.2026).
3. Efremova M.G. The Moscow International Business Center «Moscow-City» – An Innovative Project of the 21st Century: 30 Years of Construction (1991–2021) // Society: Philosophy, History,

Culture. – 2021. – № 12(92). – P. 114–120. DOI 10.24158/fik.2021.12.18 EDN LUHQAR (date of application 27.07.2026).
4. Zhuravlev A.M. Moscow-City Takes on Tangible Form // Architecture and Construction of Moscow. – 2003. – Vol. 507. – № 1. – P. 39–43.
5. Isakov A.I. High-Rise Construction in Russia // Synergy of Sciences (Synergiya Nauk). – 2016. – № 6. – P. 442–458. EDN XEQPXD (date of application 27.07.2026).
6. Challenges in the Construction of High-Rise Buildings in Major Russian Cities / T.V. Makarova [et al.] // Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: High Technologies. Ecology. – 2012. – № 1. – P. 145–149.
7. Fire at the Vostok Tower of the Federation Complex. System requirements: Internet Explorer. – URL : http://positiverussia.com/news/2012/04/03/Pozhar-na-bashne-Vostok-kompleksa-Federaciya (date of application 26.11.2016).
8. Smirnova I.N. The «Federation Tower» High-Rise Complex / I.N. Smirnova, N.V. Shilkin // AVOK: Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics. – 2015. – № 4. – P. 20–31. EDN TTTTET (date of application 27.07.2026).
9. Sonne-Frederiksen M. Articles. The «Federation» Complex. – URL : http://www.archjournal.ru (date of application 27.07.2026).
10. Tkachenko E.D. Structural Features of Skyscrapers (Federation Tower, Lakhta Center, Taipei 101) / E.D. Tkachenko, Yu.A. Guryeva // Proceedings of the International Youth School «Engineering – XXI», Novorossiysk, April 15–18, 2025. – Novorossiysk : V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2025. – P. 55–56. EDN THKGXR (date of application 27.07.2026).
11. Shilkin N. «Federation» Complex. Engineering Solutions for the «Vostok» (East) Tower / N. Shilkin, I. Smirnova, M. Efremov // High-Tech Buildings. – 2016. – № 2. – P. 32–33.

УДК 691.5

ФИБРОБЕТОНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

♦♦♦♦♦

FIBER CONCRETE USING RECYCLED MATERIALS IN MODERN CONSTRUCTION

Жиляев Андрей Александрович
студент 2 курса направления 08.04.01 Строительство,
Курский государственный университет
andreyzhilyaev@mail.ru

Научный руководитель:

Делова Маргарита Ивановна
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Курский государственный университет
delova.rita@yandex.ru

Аннотация. В статье проведен детальный обзор публикаций по применению фибробетонов, включая составы с использованием рециклированных заполнителей и переработанных материалов. Особое внимание уделено систематизации накопленного отечественного опыта по результатам лабораторных, экспериментально-технических исследований и оценке сдерживающих факторов массового применения фибробетонов на основе вторичного сырья в российских условиях.

Ключевые слова: бетон, фибробетон, дисперсное армирование, вторичное сырье, бетонные смеси, фибра, переработанные материалы, рециклированные заполнители.

Zhilyaev Andrey Alexandrovich
2nd-year Student in the field
of study 08.04.01 Construction,
Kursk State University
andreyzhilyaev@mail.ru

Research supervisor

Delova Margarita Ivanovna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kursk State University
delova.rita@yandex.ru

Annotation. The article provides a detailed review of publications on the use of fiber concrete, including compositions based on recycled aggregates and recycled materials. Particular attention is paid to the systematization of the accumulated domestic experience based on the results of laboratory, experimental and technical studies and the assessment of the restraining factors of the mass use of fiber concrete based on secondary raw materials in Russian conditions.

Keywords: concrete, fibre concrete, dispersed reinforcement, recycled raw materials, concrete mixtures, fibre, recycled materials, recycled aggregates.

Самым популярным и востребованным строительным материалом в мире остается бетон, по объему потребления уступающий только воде. Его незаменимость и масштабы использования объясняются доступностью сырья, универсальностью, прочностью и долговечностью. При этом масштабное производство бетона создает огромную нагрузку на экосистему планеты за счет выбросов углекислого газа (на производство цемента-главного вяжущего компонента бетона приходится около 8 % мировых выбросов) и накопления строительных отходов [1].

В связи с тем, что развитие строительной индустрии в настоящее время направлено на решение двух ключевых задач: соблюдение экологических требований и повышение долговечности конструкций, возникает объективная необходимость в разработке бетонов нового поколения. Для достижения этих задач отечественными и зарубежными учеными активно ведутся масштабные исследования по поиску новых технологий, оптимизации материалов и их свойств, существенно меняющие подход к производству и применению бетонных смесей.

В научных изданиях [1–5] отмечается, что в настоящее время одним из самых эффективных направлений по оптимизации строительных материалов является применение композиционных материалов, таких как фибробетоны, представляющие собой особый тип бетона, в объеме которого методом дисперсного армирования могут распределяться металлические или полимерные волокна разной геометрии. Ряд авторов [2] отмечает преимущество дисперсного армирования, в отличие от традиционного железобетонного армирования (осуществляется стержнями или сетками, расположенными в определенных зонах конструкции), в том, что являясь объемным и многонаправленным, оно обеспечивает повышенную трещиностойкость, высокую ударопрочность и вязкость разрушения, сопротивление истиранию и износу (за счет изотропности), морозостойкость и влагонепроницаемость, а также существенную экономию времени и труда (отсутствует необходимость в длительной вязке арматурных сеток).

По данным обзора публикаций [2, 3] фибробетон обладает большим количеством физико-механических свойств, отличающих его от традиционного бетона. Основное, из которых это

механизм работы под нагрузкой и характер разрушения (табл. 1): ведет себя как квазипластичный материал, способный воспринимать значительные растягивающие напряжения, в том числе после образования сквозных трещин (эффект «сшивания» трещин).

Таблица 1 – Основные отличия в механизме работы традиционного бетона и фибробетона

Наименование материала	Характеристика			
	Поведение при растяжении/ изгибе	Перераспределение напряжений	Характер разрушения	Трещиностойкость
Традиционный бетон	Хрупкое разрушение (при достижении предела прочности мгновенно образуется одна магистральная трещина, приводящая к разделению элемента)	Локализуется в зоне дефекта. Концентрация напряжений быстро разрушает матрицу бетона	Внезапный (конструкция теряет несущую способность практически мгновенно после превышения пиковой нагрузки)	Низкая (трещины раскрываются быстро и имеют большую ширину)
Фибробетон	Квазипластичное поведение (материал продолжает сопротивляться деформации после появления первых микротрещин за счет включения в работу фибр)	Рассредоточивается по всему объему (фибры перераспределяют усилия на соседние, еще не поврежденные участки матрицы)	Вязкий (разрушение происходит постепенно)	Высокая (развивается мультитрещинная структура – вместо одной широкой трещины образуется множество микротрещин)

Экспериментальные исследования показывают, что ключевым фактором, влияющим на прочность фибробетона, является тип фибры (синтетического или органического происхождения). В современном строительстве используется большое количество типов фибр, номенклатура которых постоянно расширяется, благодаря проводимым исследованиям [4, 5]. Одно из наиболее перспективных направлений – это использование вторичного сырья, которое может являться как фиброй (армирующим компонентом), так и матричной основой (заполнители и вяжущее), позволяющее одновременно решать задачи улучшение эксплуатационных свойств материала и снижения экологической нагрузки, в том числе углеродного следа строительной индустрии (табл. 2).

Таблица 2 – Эффект и преимущества от использования вторичных материалов в качестве компонента фибробетона

Компонент фибробетона	Пример вторичного сырья	Эффект и преимущества
Фибра (армирующий компонент)	Измельченная стальная кордовая лента от старых шин. Переработанный ПЭТ (вторичный полиэтилентерефталат, получаемый из утилизированных пластиковых бутылок и упаковки), пластик. Углеродное волокно из отходов авиа/автопрома	Сдерживает раскрытие трещин, повышает прочность на растяжение при изгибе и ударную вязкость. Переработанный пластик, в том числе снижает вес конструкции
Матричная основа (заполнители)	Дробленый бетонный лом (рециклированный заполнитель). Стеклобой (мелкий заполнитель). Шлаки металлургического производства	Сокращает добычу природных ресурсов. Правильно подготовленный бетонный лом сохраняет высокую прочность. Стеклобой улучшает декоративные свойства и плотность
Матричная основа (вяжущее)	Зола-унос ТЭС (образуется при сжигании твердого топлива на тепловых электростанциях и улавливается золоуловителями из дымовых газов). Доменный гранулированный шлак. Микрокремнезем	Снижает углеродный след за счет замены части цемента пуццолановыми отходами и повышает сульфатостойкость бетона

По данным обзора публикаций [4–8] было установлено, что благодаря постоянно проводимым исследованиям по использованию вторичного сырья при производстве фибробетонов зарубежными и отечественными учеными предлагаются оптимальные составы, снижающие

стоимость строительства, трудозатраты при увеличении надежности и долговечности строительных конструкций.

Детальный анализ имеющихся на сегодняшний день результатов лабораторных и экспериментально-технических исследований, несмотря на очевидные преимущества, показал ряд факторов сдерживающих массовое применение фибробетонов на основе рециклированных заполнителей и переработанных материалов в российских условиях: малый опыт применения (отсутствие долгосрочного мониторинга), отсутствие отлаженной технологии производства (нестабильность сырья, сложность дозирования и перемешивания) и контроля качества (технического регулирования). Поэтому возникает необходимость не только в проведении дальнейших научных исследований в области применения фибробетонов на основе вторичного сырья, но и в разработке соответствующих стандартов, создании цифровых систем контроля качества, государственной поддержке и стимулировании.

Литература

1. Мерненко В.С. Применение фибробетона в большепролетных зданиях // Молодежь и системная модернизация страны: Сборник научных статей 10-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых : в 5-ти томах, Курск, 14–15 мая 2026 года. – Т. 4. Технологии продуктов питания. Строительство. Градостроительство и архитектура. Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды. – Курск : ЗАО «Университетская книга», 2026. – С. 246–249.
2. Путилина В.Н. Применение фибробетона для возведения большепролетных зданий // Проблемы развития современного общества: Сборник научных статей 11-й Всероссийской национальной научно-практической конференции : в 4-х томах, Курск, 19–20 января 2026 года. – Т. 4. Строительство. Градостроительство и архитектура. Безопасность жизнедеятельности и охрана окружающей среды. Фундаментальные и прикладные исследования в области физики, химии, математики, механики. Прогрессивные технологии и процессы. Энергетика и энергосбережение. Сельское хозяйство, Механизация. Агрономия. Легкая и текстильная промышленность. – Курск : ЗАО «Университетская книга», 2026. – С. 124–129.
3. Шилов П.А. Программа и результаты экспериментальных исследований характеристик фибробетона, изготовленного по механической технологии создания агрегированного ориентированного фибрового армирования / П.А. Шилов, А.А. Шилов // Строительство и архитектура – 2023: материалы международной научно-практической конференции факультета промышленного и гражданского строительства, Ростов-на-Дону, 19–21 апреля 2023 года. – Ростов-н/Д. : Донской государственный технический университет, 2023. – С. 134–135.
4. Физико-технические свойства фибробетонов с использованием вторичного минераловатного сырья / О.В. Демьяненко [и др.] // Строительные материалы. – 2019. – № 7. – С. 16–20.
5. Ларсен О.А. Мелкозернистые бетоны с фиброй из переработанного поливинилхлорида / О.А. Ларсен, Д. Альобаиди, С.В. Самченко // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2026. – Т. 18. – № 2. – С. 254–264.
6. Портнов Ф.А. Повышение прочности и экологичности бетонов за счет применения в их составе минеральных волокон // Московский экономический журнал. – 2020. – № 1. – 12 с.
7. Корсаков Н.В. Анализ долговечности сталефибробетонных конструкций в условиях знакопеременных температур / Н.В. Корсаков, Т.И. Корсакова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 6-3(81). – С. 122–126.
8. Магеррамова И.А. Железобетонные конструкции из торкретированных легких бетонов и фибробетонов с модифицированными заполнителями и фибрами из отходов местных производств : дис. … канд. техн. наук / Магеррамова Инна Александровна. – 2022. – 166 с.

References

1. Mernenko V.S. Application of Fiber-Reinforced Concrete in Long-Span Buildings // Youth and the Systemic Modernization of the Country: Proceedings of the 10th International Scientific Conference of Students and Young Scientists (in 5 vol.), Kursk, May 14–15, 2026. – Vol. 4: Food Technology; Construction; Urban Planning and Architecture; Life Safety and Environmental Protection. – Kursk : ZAO «Universitetskaya Kniga», 2026. – P. 246–249.
2. Putilina V.N. The Use of Fiber-Reinforced Concrete for the Construction of Long-Span Buildings // Problems of Modern Society Development: Collection of Scientific Articles from the 11th All-Russian National Scientific and Practical Conference (in 4 vol.), Kursk, January 19–20, 2026. – Vol. 4. Construction; Urban Planning and Architecture; Life Safety and Environmental Protection; Fundamental and Applied Research in Physics, Chemistry, Mathematics, and Mechanics; Advanced Technologies and Processes; Energy and Energy Conservation; Agriculture, Mechaniza-

tion, and Agronomy; Light and Textile Industry. – Kursk : ZAO «Universitetskaya Kniga», 2026. – P. 124–129.
3. Shilov P.A. Program and results of experimental studies on the characteristics of fiber-reinforced concrete produced using a mechanical technique for creating aggregated, oriented fiber reinforcement / P.A. Shilov, A.A. Shilov // Construction and Architecture – 2023: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of the Faculty of Industrial and Civil Engineering, Rostov-on-Don, April 19–21, 2023. – Rostov-on/D. : Don State Technical University, 2023. – P. 134–135.
4. Physico-technical properties of fiber-reinforced concrete using recycled mineral wool raw materials / O.V. Demyanenko [et al.] // Construction Materials. – 2019. – № 7. – P. 16–20.
5. Larsen O.A. Fine-grained concrete with fibers made from recycled polyvinyl chloride / O.A. Larsen, D. Alyobaidi, S.V. Samchenko // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Online Journal. – 2026. – Vol. 18. – № 2. – P. 254–264.
6. Portnov F.A. Improving the strength and environmental sustainability of concrete through the use of mineral fibers // Moscow Economic Journal. – 2020. – № 1. – 12 p.
7. Korsakov N.V. Analysis of the Durability of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Structures Under Conditions of Alternating Temperatures / N.V. Korsakov, T.I. Korsakova // International Journal of Humanities and Natural Sciences. – 2023. – № 6-3(81). – P. 122–126.
8. Magerramova I.A. Reinforced Concrete Structures Made of Shotcreted Lightweight Concrete and Fiber-Reinforced Concrete with Modified Aggregates and Fibers Derived from Local Industrial Waste : dis. … for Degree of Candidate of Technical Sciences / Inna Aleksandrovna Magerramova. – 2022. – 166 p.

УДК 327:666.97.033

ПАРАМЕТРЫ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ КАК КРИТЕРИЙ ПРИЕМКИ ВИБРОПРЕССОВАННЫХ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ: ОТ НАУЧНОГО АППАРАТА К НОРМАТИВНОЙ ПРАКТИКЕ

♦♦♦♦♦

PORE STRUCTURE PARAMETERS AS AN ACCEPTANCE CRITERION FOR VIBROPRESSED CONCRETE PRODUCTS: FROM SCIENTIFIC FRAMEWORK TO REGULATORY PRACTICE

Зиновьев А.А.
аспирант,
Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет
Flagman.Him@gmail.com

Булгаков Б.И.
кандидат технических наук,
доцент,
Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет
BulgakovBI@mgsu.ru

Ляпидевская О.Б.
кандидат технических наук,
доцент,
Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет
LyapidevskayaOB@mgsu.ru

Zinoviev A.A.
Graduate Student,
National Research Center Moscow
State University of Civil Engineering
Flagman.Him@gmail.com

Bulgakov B.I.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
National Research Center Moscow
State University of Civil Engineering
BulgakovBI@mgsu.ru

Lyapidevskaya O.B.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
National Research Center Moscow
State University of Civil Engineering
LyapidevskayaOB@mgsu.ru

Аннотация. Рассмотрено несоответствие между развитым научным аппаратом оценки поровой структуры бетона и действующей практикой приемки вибропрессованных изделий, при которой качество партии подтверждается главным образом прочностью. Прослежено развитие представлений о роли капиллярной и условно замкнутой пористости от работ школы Г.И. Горчакова до диссертационных исследований 2000-х гг., посвященных вибропрессованным элементам мощения, и показано, что параметры поровой структуры так и не вошли в приемочные требования нормативных документов. Систематизированы расходящиеся позиции исследователей по применению воздухововлекающих добавок при вибропрессовании. По результатам количественного анализа шлифов 13 серий тротуарной плитки по ГОСТ Р 70753-2023 установлено, что в пяти из шести пар серий одного состава более плотная серия содержит меньше пор диаметром 0,8–4 мм, однако при одинаковой средней плотности (2307–2315 и 2355–2362 кг/м³) доля таких пор у разных составов различается в 1,4–1,5 раза. Обоснованы ограничения ртутной порометрии как метода проверки данных оптической микроскопии для вибропрессованного бетона и определено место рентгеновской микротомографии. Сформулированы задачи по переводу структурных параметров в процедуру производственного контроля.

Ключевые слова: вибропрессованный бетон, поровая структура, условно замкнутая пористость, морозостойкость, воздухововлечение, ГОСТ Р 70753, ртутная порометрия, контроль качества, элементы мощения.

Annotation. The paper addresses the gap between the well-developed scientific framework for assessing concrete pore structure and the current acceptance practice for vibropressed products, where batch quality is confirmed mainly by compressive strength. The development of the concept of capillary and conditionally closed porosity is traced from the works of G.I. Gorchakov's school to the dissertations of the 2000s on vibropressed paving elements; it is shown that pore structure parameters have not been included in the acceptance requirements of standards. Conflicting views on the use of air-entraining admixtures in vibropressing are systematised. Quantitative analysis of polished sections of 13 series of paving slabs according to GOST R 70753-2023 showed that in five of six pairs of series of the same mix the denser series contains fewer pores 0.8–4 mm in diameter; however, at equal mean density (2307–2315 and 2355–2362 kg/m³) the fraction of such pores in different mixes differs by a factor of 1.4–1.5. The limitations of mercury intrusion porosimetry as a method for verifying optical microscopy data for vibropressed concrete are substantiated, and the role of X-ray micro-tomography is defined. Tasks for transferring structural parameters into production quality control are formulated.

Keywords: vibropressed concrete, pore structure, conditionally closed porosity, frost resistance, air entrainment, GOST R 70753, mercury intrusion porosimetry, quality control, paving elements.

Введение

Производство вибропрессованных бетонных изделий в России за последние годы стало одним из наиболее динамичных сегментов промышленности сборного бетона: по отраслевым данным, объем рынка вибропрессованной продукции вырос с 30,7 млн м² в 2019 г. до 78,0 млн м² в 2024 г., а число производителей – с 430 до 770 [1]. Быстрый рост сопровождался расширением сырьевой базы и усилением ценовой конкуренции, что сказывается на стабильности качества.

При этом приемка элементов мощения по ГОСТ 17608-2017 [2] опирается на показатели, определяемые на готовых образцах: прочность, водопоглощение, истираемость, морозостойкость. Морозостойкость подтверждается периодическими испытаниями и в повседневном контроле фактически замещается прочностью. Ранее авторами было показано, что составы вибропрессованного бетона одного класса по прочности (57–68 МПа) могут существенно различаться по потере прочности после ускоренных испытаний, и это различие связано с характеристиками порового пространства, а не с прочностью [3]. Результаты указанной работы здесь не повторяются.

Цель настоящей статьи – показать, что научный аппарат оценки поровой структуры бетона сложился давно, определить причины, по которым он не вошел в практику приемки вибропрессованных изделий, и на новом массиве данных обсудить методические условия его применения в производственном контроле.

1. Научный аппарат оценки поровой структуры

Представление о том, что морозостойкость бетона определяется не столько общей пористостью, сколько ее характером, сформировалось в отечественном бетоноведении в 1960–1970-е гг. Г.И. Горчаков связал морозостойкость с капиллярной пористостью цементного камня и ввел разделение пор на капиллярные, доступные для воды при обычном насыщении, и условно замкнутые, которые остаются незаполненными и принимают на себя часть давления при замерзании [4]. На этой основе в работах А.Е. Шейкина, Л.М. Добшица и их последователей были предложены расчетные критерии морозостойкости, учитывающие соотношение объемов условно замкнутых и капиллярных пор [5].

Экспериментальная база аппарата сложилась в тот же период. Методом ртутной порометрии П.П. Ступаченко получил данные о распределении пор цементного камня по размерам и об их изменении в процессе твердения [6]; эти результаты до сих пор приводятся в монографиях по технологии бетона, в том числе посвященных вибропрессованию [7]. В последние годы аппарат продолжает применяться: так, для мелкозернистого бетона получены регрессионные зависимости морозостойкости от параметров поровой структуры, и показано, что связь морозостойкости с общей и открытой пористостью слабее, чем с показателями среднего размера пор, однородности пор по размерам и коэффициентом условной замкнутости [8].

К началу 2000-х гг. уже имелись и теоретическое обоснование, и экспериментальные методы, позволяющие оценивать поровую структуру бетона. Поэтому вопрос о новизне подхода применительно к вибропрессованному бетону корректно ставить не как вопрос об идее, а как вопрос о ее переносе на особый вид бетона и о ее нормативном закреплении.

2. Применение к вибропрессованному бетону и разрыв с нормативной практикой

Вибропрессованный бетон отличается от бетона литых и пластичных смесей низким начальным водосодержанием, жесткостью смеси и тем, что его структура формируется под совместным действием вибрации и пригруза. В результате наряду с порами цементного камня в нем присутствуют межзерновые пустоты и дефекты недоуплотнения размером до нескольких миллиметров.

Перенос аппарата Горчакова на вибропрессованные изделия выполнен в ряде диссертационных работ 2000-х гг. А.У. Магдеев (МГСУ, 2003) снижал капиллярную пористость мелкозернистого бетона элементов мощения за счет обогащения песка и комплексных добавок и одновременно создавал условно замкнутую пористость с помощью воздухововлечения; при этом водоцементное отношение было снижено с 0,31 до 0,28–0,29, а для песка с модулем крупности 2,5–3,0 на портландцементе ПЦ 500-Д0 получены классы В45–В50 и марка F300 [9]. Близкие задачи для дорожных вибропрессованных изделий и для мелкозернистых жесткопрессованных бетонов решались в работах О.М. Сафиной [10] и Е.О. Лотошниковой [11]. За рубежом испытания изделий из жестких смесей на морозостойкость регламентированы ASTM C1262 [12]; вместе с тем исследователи отмечали, что классические параметры воздушных пор, разработанные для пластичного бетона, хуже предсказывают морозостойкость таких изделий [13].

Несмотря на это, ни ГОСТ 17608-2017 [2], ни ГОСТ 25192-2012 [14] не содержат требований к параметрам поровой структуры готового изделия. Приемочный контроль оперирует интегральными свойствами, а сведения о структуре остаются за пределами документа о качестве. Разрыв лежит не в области знаний, а в области их внедрения: отсутствует стандартизированная процедура, которая связывала бы измеряемые параметры пор с требованиями к изделию.

3. Воздухововлечение при вибропрессовании: расхождение позиций

Нормирование затрудняет и то, что нет согласия по важному технологическому вопросу – целесообразности воздухововлечения в жестких смесях. Позиции исследователей сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Позиции исследователей по применению воздухововлечения в жестких бетонных смесях

Источник	Объект	Позиция	Условия и обоснование
Магдеев А.У., 2003 [9]	Мелкозернистый вибропрессованный бетон элементов мощения	За	Воздухововлечение в составе комплексной добавки создает условно замкнутую пористость
Батяновский Э.И., Бондарович А.И., 2018 [7]	Вибропрессованный бетон	Против	Эффект «декомпрессии» вовлеченного воздуха после формования может приводить к разуплотнению и трещинам; рекомендовано повышать плотность
Иванов И.М., Крамар Л.Я., Шулдяков К.В., 2022 [15]	Бетоны особо низкой проницаемости	Не обязательно	При высоком водоредуцировании морозостойкость на шлакопортландцементе достигается без специального воздухововлечения
Chan C. и др., 2007 [13]	Изделия из жестких смесей (подпорные стены)	Ограниченная применимость критериев	Классические параметры воздушных пор хуже предсказывают морозостойкость сухих прессованных смесей
Tanesi J., Meininger R., 2006 [16]	Дорожный бетон	Критерии не универсальны	Морозостойкость при одинаковом воздухосодержании зависит от вида воздухововлекающей добавки

Из таблицы 1 видно, что противоречие скорее условное, чем принципиальное: эффект воздухововлечения зависит от водоцементного отношения, вида цемента и интенсивности уплотнения, а также от вида добавки [16]. Единой модели, позволяющей заранее указать область эффективного применения воздухововлекающих добавок именно для вибропрессования, в рассмотренных источниках нет. Поэтому поровую структуру нужно оценивать непосредственно в готовом изделии, а не судить о ней по рецептуре.

4. Материалы и методы

Объектом исследования служили образцы вибропрессованной тротуарной плитки 13 серий: четыре варианта рецептуры (Вариант 1–4, обозначения В1–В4), контрольный состав (К) и состав с добавкой 2 (Д2), каждый из которых представлен двумя сериями разной средней плотности (индексы «н» – меньшая, «в» – большая плотность), а также одна серия состава 3 (С3). Средняя плотность серий находилась в пределах 2266–2403 кг/м³. Серии одного состава с разной плотностью рассматривались раздельно, без объединения, поскольку разница в плотности внутри пары отражает степень уплотнения при формовании, и сама является предметом анализа.

Поровую структуру определяли на полированных шлифах методом микроскопического количественного анализа по ГОСТ Р 70753-2023 [17] с автоматизированной обработкой изображений. Наряду с параметрами, предусмотренными стандартом (в том числе фактором расстояния между порами $\hat{Z}$), поры были сгруппированы по эквивалентному диаметру: 0–0,3; 0,3–0,5; 0,5–0,8 мм (условно замкнутые, или условно полезные, поры) и 0,8–4 мм (условно вредные поры). Граница 0,8 мм принята авторами для целей сопоставления и не является нормируемым параметром стандарта, в котором для разделения учитываемых и неучитываемых пор используется порог 0,5 мм. Подход к описанию системы воздушных пор по шлифам соответствует также ASTM C457 [18].

Долю пор каждой фракции определяли как отношение суммарной площади их сечений к площади анализа по формуле (1):

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{n} s_i}{S} \cdot 100 \qquad (1)$$

где x – доля пор данной фракции, % площади шлифа; s_i – площадь сечения i-й поры фракции, мм²; n – число пор фракции в анализе; S – площадь анализа, мм².

Площадь анализа одной серии составляла от $11{,}4 \cdot 10^3$ до $23{,}4 \cdot 10^3$ мм². Испытания на морозостойкость для этого массива не проводились, поэтому результаты в разделе 5 рассматриваются как описательные.

5. Результаты

Распределение пор по размерам для всех 13 серий приведено в таблицы 2 и на рисунке 1.

Таблица 2 – Средняя плотность и распределение пор по размерам в 13 сериях (доля площади шлифа, %)

Состав	Серия	Средняя плотность, кг/м³	0–0,3 мм	0,3–0,5 мм	0,5–0,8 мм	Сумма 0–0,8 мм	0,8–4 мм
Вариант 1	В1-н	2315	0,94	1,36	2,38	4,68	7,50
Вариант 1	В1-в	2355	0,66	0,98	1,90	3,54	5,24
Вариант 2	В2-н	2266,5	0,95	1,33	2,16	4,44	6,77
Вариант 2	В2-в	2308,5	0,87	1,17	1,96	4,00	6,14
Вариант 3	В3-н	2307,5	0,78	1,07	1,92	3,77	5,00
Вариант 3	В3-в	2356,5	0,69	0,96	1,86	3,51	4,29
Вариант 4	В4-н	2297,5	0,75	1,12	2,06	3,93	6,45
Вариант 4	В4-в	2332,5	0,78	1,14	2,10	4,02	6,40
Контрольный	К-н	2315	0,91	1,29	2,25	4,45	6,02
Контрольный	К-в	2355,5	0,77	1,07	1,78	3,62	3,85
С добавкой 2	Д2-н	2272	0,69	1,04	1,83	3,55	6,24
С добавкой 2	Д2-в	2362	0,85	1,16	2,05	4,06	4,58
Состав 3	С3	2403	0,93	1,22	1,90	4,05	4,58

Примечание: Суммы рассчитаны по неокругленным значениям; индексы «н» и «в» – серии меньшей и большей плотности одного состава.

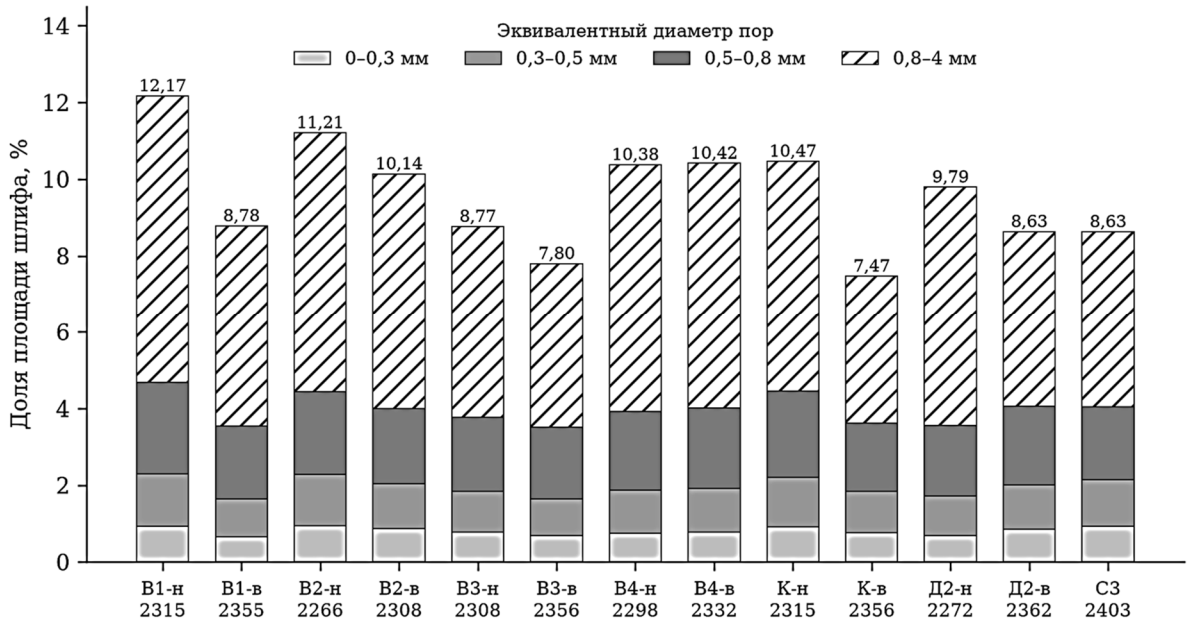


Рисунок 1 – Распределение пор по размерам в 13 сериях
(под обозначением серии указана средняя плотность, кг/м³)

Суммарная доля пор, видимых на шлифе, составила от 7,47 % (К-в) до 12,17 % (В1-н). Доля условно полезных пор 0–0,8 мм изменяется в узком интервале – от 3,51 % (В3-в) до 4,68 % (В1-н), т.е. в 1,33 раза. Доля условно вредных пор 0,8–4 мм изменяется значительно шире – от 3,85 % (К-в) до 7,50 % (В1-н), т.е. в 1,94 раза. Серии различаются прежде всего по крупным порам.

Влияние степени уплотнения прослеживается по парам серий одного состава (рис. 2). В пяти парах из шести у более плотной серии доля вредных пор меньше: для В1 – на 2,26 п.п., для К – на 2,16, для Д2 – на 1,66, для В3 – на 0,71, для В2 – на 0,63 п.п. В паре В4 при увеличении плотности на 35 кг/м³ доля вредных пор практически не изменилась (6,45 и 6,40 %). Доля полезных пор внутри пар меняется слабее и разнонаправленно: в парах В1, В2, В3 и К она снижается с ростом плотности, в парах В4 и Д2 – возрастает.

Однако плотность сама по себе поровую структуру не определяет. Серии с практически одинаковой средней плотностью 2307–2315 кг/м³ (В1-н, В2-в, В3-н, К-н) имеют долю вредных пор 7,50; 6,14; 5,00 и 6,02 % соответственно, т.е. различаются в 1,50 раза. Серии с плотностью 2355–2362 кг/м³ (В1-в, В3-в, К-в, Д2-в) – 5,24; 4,29; 3,85 и 4,58 %, различие в 1,36 раза. Наиболее плотная серия С3 (2403 кг/м³) по доле вредных пор (4,58 %) не отличается от серий плотностью 2355–2362 кг/м³. Коэффициент корреляции между средней плотностью и долей вредных пор по 13 сериям равен –0,71 ($r^2 \approx 0,50$), между плотностью и долей полезных пор – –0,24. Плотность описывает лишь около половины изменчивости доли крупных пор; при малом объеме выборки эти оценки следует рассматривать как ориентировочные.

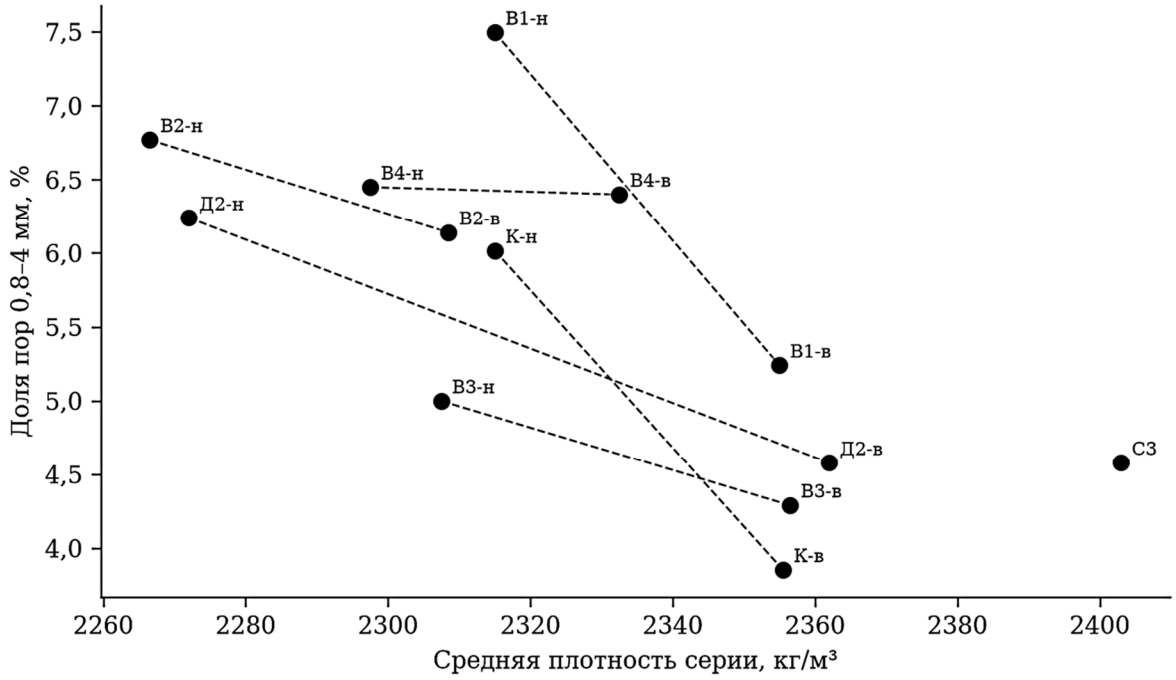


Рисунок 2 – Доля условно вредных пор 0,8–4 мм в зависимости от средней плотности серии
(пунктир соединяет серии одного состава)

На уровне отдельных серий выделяется серия В1-н: при наибольшей доле вредных пор доля пор крупнее 0,5 мм в общем их числе составила для нее около 17 % против 9–13 % у остальных серий, а концентрация пор N_1 – около 4 шт/мм³ против 10–18 шт/мм³. Это отклонение может быть связано как с недоуплотнением, так и с пробоподготовкой конкретного шлифа и требует повторной проверки.

Полученные данные согласуются с выводом предыдущей работы [3]: интегральные показатели (там – прочность, здесь – средняя плотность) не описывают однозначно поровую структуру вибропрессованного бетона. Два изделия, неразличимые при обычном приемочном контроле, могут иметь существенно разное распределение пор по размерам.

6. Обсуждение: методическое обоснование контроля поровой структуры

Если поровая структура должна стать предметом контроля, нужно определить, каким методом ее измерять и чем проверять результаты. Для проверки данных оптической микроскопии напрашивается сравнение с ртутной порометрией – широко распространенным методом исследования пористых тел [19]. Однако для вибропрессованного бетона такое сравнение нецелесообразно: ртутная порометрия определяет капиллярные поры, размер которых в десятки раз меньше, чем у пустот, значимых для вибропрессованных изделий. Кроме того, сопоставление двух методов имеет ряд принципиальных ограничений.

Во-первых, ртутная порометрия регистрирует только поры, доступные для вдавливания ртути с поверхности образца. Изолированные и условно замкнутые поры, которые и представляют наибольший интерес с позиции морозостойкости, в результат не входят. Отсутствие поры в данных порометрии означает лишь ее недоступность для ртути.

Во-вторых, метод определяет не размер полости, а эквивалентный диаметр входного сужения [20]. Крупная пора, сообщающаяся с поверхностью узким каналом, будет отнесена к мелким. Поэтому прямое сопоставление распределений пор по размерам, полученных двумя методами, некорректно.

В-третьих, рабочий диапазон ртутной порометрии ограничен сверху порами размером порядка сотен микрометров [20], тогда как в вибропрессованном бетоне значимую часть порового пространства составляют поры 0,3–4 мм (табл. 2). Эта область уверенно контролируется только на шлифах.

Ртутную порометрию поэтому целесообразно применять как дополнительный метод для характеристики открытой капиллярной пористости цементной матрицы, но не как средство количественной проверки данных оптической микроскопии о воздушных порах. Сравнительная характеристика методов приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Сопоставление методов оценки поровой структуры вибропрессованного бетона

Характеристика	Оптическая микроскопия шлифов	Ртутная порометрия	Рентгеновская микротомография
Что измеряется	Сечения пор в плоскости шлифа	Объем пор, доступных для ртути, по диаметрам входных сужений	Объемная система пор
Замкнутые поры	Регистрируются	Не регистрируются	Регистрируются
Поры 0,3–4 мм	Основной диапазон метода	Вне уверенного диапазона	Регистрируются при соответствующем разрешении
Параметры системы воздушных пор ($\hat{Z}$, N_1, фракции)	Определяются по ГОСТ Р 70753-2023, ASTM C457	Не определяются	Определяются в объеме
Представительность	Серия шлифов из разных зон изделия	Малая локальная проба	Ограничена размером образца и характерстками оборудования
Роль при контроле	Основной метод	Дополнительный (открытая пористость матрицы)	Эталонный, исследовательский

Ограничение метода шлифов – его двумерность. Рентгеновская микротомография позволяет оценивать объемную систему пор и их связность без разрушения образца и уже применяется для анализа воздушных пор в связи с морозостойкостью бетона [21]. Для отраслевого контроля она пока остается исследовательским инструментом, но может служить эталоном при калибровке методики по шлифам. Для проверки достоверности оптического анализа на производстве более обоснованно сопоставлять его результаты с испытаниями на морозостойкость, водопоглощение и среднюю плотность.

Для практики важно, что уже разработаны методики ускоренной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона в изделиях [22] и экспресс-методы, основанные на изменении характеристик бетона после однократного глубокого замораживания [23]. В сочетании с количественным анализом шлифов они образуют основу для производственного контура контроля, в котором структурный показатель определяется оперативно, а периодические испытания по ГОСТ 10060-2012 [24] служат для его калибровки.

Заключение

1. Аппарат оценки поровой структуры бетона, основанный на разделении капиллярной и условно замкнутой пористости, сложился в отечественном бетоноведении в 1960–1970-е гг. и в 2000-е гг. был применен к вибропрессованным элементам мощения. Параметры поровой структуры при этом не вошли в приемочные требования ГОСТ 17608-2017 и ГОСТ 25192-2012; разрыв лежит в области внедрения, а не знаний.

2. Позиции исследователей по воздухововлечению при вибропрессовании расходятся и зависят от водоцементного отношения, вида цемента и режима уплотнения, что подтверждает необходимость контролировать фактически полученную поровую структуру, а не только рецептуру.

3. Количественный анализ шлифов 13 серий тротуарной плитки по ГОСТ Р 70753-2023 показал, что повышение средней плотности в пределах одного состава в пяти парах из шести сопровождается снижением доли пор 0,8–4 мм (на 0,63–2,26 п.п.), однако при одинаковой плотности (2307–2315 и 2355–2362 кг/м³) доля таких пор у разных составов различается в 1,4–1,5 раза. Средняя плотность, как и прочность, не является достаточной характеристикой структуры вибропрессованного бетона.

4. Ртутная порометрия не может служить прямым средством проверки данных оптической микроскопии о воздушных порах вибропрессованного бетона, поскольку не учитывает замкнутые поры, измеряет размер входных сужений и не охватывает поры размером 0,3–4 мм. Ее место – характеристика открытой пористости цементной матрицы; эталоном для калибровки метода шлифов может служить рентгеновская микротомография.

5. Дальнейшие задачи – установить по результатам испытаний по ГОСТ 10060-2012 количественную связь структурных параметров с морозостойкостью на расширенной выборке составов и сырья и подготовить предложения по включению структурного контроля в нормативные документы на вибропрессованные изделия.

Литература

1. Обзор рынка вибропрессованных изделий в России (по данным АПМБИ) // Строительные материалы. – 2025.
2. ГОСТ 17608-2017. Плиты бетонные тротуарные. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2018.
3. Зиновьев А.А. Прогнозирование морозостойкости бетона с помощью микроструктурного анализа на примере вибропрессованных изделий / А.А. Зиновьев, Б.И. Булгаков, О.Б. Ляпидевская // Бетон и железобетон. – 2026. – № 1(632). – С. 62–70. – DOI: 10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70
4. Горчаков Г.И. Морозостойкость бетона в зависимости от его капиллярной пористости // Бетон и железобетон. – 1974. – № 7.
5. Шейкин А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости / А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Л. : Стройиздат, 1989. – 128 с.
6. Ступаченко П.П. Структурная пористость и ее связь со свойствами цементных, силикатных и гипсовых материалов // Труды Дальневосточного политехнического института им. В.В. Куйбышева. – 1964. – Т. 63. – Вып. 1. – С. 3–62.
7. Батяновский Э.И. Вибропрессованный бетон: технология и свойства : монография / Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович. – Мн. : БНТУ, 2018. – 263 с.
8. Мирзажанов М.А. Поровая структура и морозостойкость бетона // Известия Ошского технологического университета. – 2019. – № 3.
9. Магдеев А.У. Вибропрессованные элементы мощения с повышенными эксплуатационными свойствами из мелкозернистого бетона : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – М., 2003. – 170 с.
10. Сафина О.М. Дорожные вибропрессованные бетонные изделия с повышенными эксплуатационными характеристиками : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Уфа, 2002. – 174 с.
11. Лотошникова Е.О. Мелкозернистые жесткопрессованные бетоны с демпфирующими добавками : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Ростов н/Д, 2005. – 221 с.
12. ASTM C1262/C1262M. Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Dry-Cast Segmental Retaining Wall Units and Related Concrete Units. West Conshohocken: ASTM International.
13. Frost durability indexes of segmental retaining wall units / C. Chan [и др.] // ACI Materials Journal. – 2007. – Vol. 104. – № 1. – P. 23–32.
14. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – М. : Стандартинформ, 2013.
15. Иванов И.М. Механизм морозного разрушения бетонов с особо низкой проницаемостью / И.М. Иванов, Л.Я. Крамар, К.В. Шулдяков // Цемент и его применение. – 2022. – № 4. – С. 57–66. – URL : https://jcement.ru/magazine/vypusk-4-2022/mekhanizm-moroznogo-razrushen iya-betonov-s-osobo-nizkoy-pronitsaemostyu (дата обращения 15.10.2026).
16. Tanesi J. Freeze-Thaw Resistance of Concrete with Marginal Air Content: Report FHWA-HRT-06-117 / J. Tanesi, R. Meininger. – McLean : Federal Highway Administration, 2006.
17. ГОСТ Р 70753-2023. Бетоны. Метод микроскопического количественного анализа структуры. – М. : Российский институт стандартизации, 2023.
18. ASTM C457/C457M. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. West Conshohocken: ASTM International.
19. Фандеев В.П. Методы исследования пористых структур / В.П. Фандеев, К.С. Самохина // Науковедение: интернет-журнал. – 2015. – Т. 7. – № 4. – DOI: 10.15862/34TVN415
20. ASTM D4404-18. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. West Conshohocken : ASTM International, 2018.
21. Freeze–thaw resistance and air-void analysis of concrete with recycled glass–pozzolan using X-ray micro-tomography / M. Krstic [et al.] // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 1. – Art. 154. – DOI: 10.3390/ma14010154
22. Бондарович А.И. Методика ускоренной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона в изделиях / А.И. Бондарович, Э.И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона. – 2014. – № 6. – С. 34–44.
23. Патент 2837619 Российская Федерация. Способ испытания бетона на морозостойкость / А.И. Панченко, И.Я. Харченко, А.О. Мурашов; патентообладатель НИУ МГСУ. Опубл. 02.04.2025.
24. ГОСТ 10060-2012. Бетоны. Методы определения морозостойкости. – М. : Стандартинформ, 2014.

References

1. Market Overview of Vibro-Pressed Products in Russia (based on APMBI data) // Construction Materials. – 2025.
2. GOST 17608-2017. Concrete Paving Slabs. Specifications. – M. : Standartinform, 2018.
3. Zinovyev A.A. Predicting the Frost Resistance of Concrete via Microstructural Analysis: A Case Study of Vibro-Pressed Products / A.A. Zinovyev, B.I. Bulgakov, O.B. Lyapidevskaya // Concrete and Reinforced Concrete. – 2026. – № 1(632). – P. 62–70. DOI: 10.37538/0005-9889-2026-1(632)-62-70
4. Gorchakov G.I. Frost resistance of concrete as a function of its capillary porosity // Concrete and Reinforced Concrete. – 1974. – № 7.
5. Sheikin A.E. Cement concretes with high frost resistance / A.E. Sheikin, L.M. Dobshits. – L. : Stroyizdat, 1989. – 128 p.
6. Stupachenko P.P. Structural porosity and its relationship to the properties of cement, silicate, and gypsum-based materials // Proceedings of the V.V. Kuibyshev Far Eastern Polytechnic Institute. – 1964. – Vol. 63. – Iss. 1. – P. 3–62.
7. Batyanovsky E.I. Vibro-pressed Concrete: Technology and Properties : monograph / E.I. Batyanovsky, A.I. Bondarovich. – Mn. : BNTU, 2018. – 263 p.
8. Mirzazhanov M.A. Pore Structure and Frost Resistance of Concrete // Proceedings of Osh Technological University. – 2019. – № 3.
9. Magdeev A.U. Vibro-pressed Paving Elements with Enhanced Performance Characteristics Made of Fine-grained Concrete : dis. … for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.23.05. – M., 2003. – 170 p.
10. Safina O.M. Vibro-pressed concrete products for road construction with enhanced performance characteristics : Dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.23.05. – Ufa, 2002. – 174 p.
11. Lotoshnikova E.O. Fine-grained, rigidly pressed concretes with damping additives : Dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.23.05. – Rostov-on/D., 2005. – 221 p.
12. ASTM C1262/C1262M. Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Dry-Cast Segmental Retaining Wall Units and Related Concrete Units. West Conshohocken: ASTM International.
13. Frost durability indexes of segmental retaining wall units / C. Chan [и др.] // ACI Materials Journal. – 2007. – Vol. 104. – № 1. – P. 23–32.
14. GOST 25192-2012. Concretes. Classification and general technical requirements. – M. : Standartinform, 2013.
15. Ivanov I.M. Mechanism of Frost-Induced Deterioration in Concretes with Extremely Low Permeability / I.M. Ivanov, L.Ya. Kramar, K.V. Shuldyakov // Cement and Its Applications. – 2022. – № 4. – P. 57–66. – URL : https://jcement.ru/magazine/vypusk-4-2022/mekhanizm-moroznogo-razrusheniya-betonov-s-osobo-nizkoy-pronitsaemostyu (date of application 15.10.2026).
16. Tanesi J. Freeze-Thaw Resistance of Concrete with Marginal Air Content: Report FHWA-HRT-06-117 / J. Tanesi, R. Meininger. – McLean : Federal Highway Administration, 2006.
17. GOST R 70753-2023. Concretes. Method for microscopic quantitative analysis of structure. – M. : Russian Institute for Standardization, 2023.
18. ASTM C457/C457M. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. West Conshohocken: ASTM International.
19. Fandeev V.P. Methods for studying porous structures / V.P. Fandeev, K.S. Samokhina // Science: online journal. – 2015. – Vol. 7. – № 4. DOI: 10.15862/34TVN415
20. ASTM D4404-18. Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. West Conshohocken : ASTM International, 2018.
21. Freeze–thaw resistance and air-void analysis of concrete with recycled glass–pozzolan using X-ray micro-tomography / M. Krstic [et al.] // Materials. 2021. Vol. 14. № 1. Art. 154. DOI: 10.3390/ma14010154
22. Bondarovich A.I. Methodology for the accelerated assessment of frost resistance of vibro-pressed concrete in finished products / A.I. Bondarovich, E.I. Batyanovsky // Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. – 2014. – № 6. – P. 34–44.
23. Patent 2837619 Russian Federation. Method for testing the frost resistance of concrete / A.I. Panchenko, I.Ya. Kharchenko, A.O. Murashov; patent holder: NRU MGSU. Published: 02.04.2025.
24. GOST 10060-2012. Concretes. Methods for determining frost resistance. – M. : Standartinform, 2014.

УДК 691.32:620.179.1

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ: СОПОСТАВИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ

♦♦♦♦♦

NON-DESTRUCTIVE METHODS FOR TESTING CONCRETE STRENGTH IN STRUCTURES: COMPARABILITY OF RESULTS AND SOURCES OF ERROR

Иванчук Валерия Романовна
студентка кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
ivanchuk.val@yandex.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены проблемы практического применения неразрушающих методов контроля прочности бетона в конструкциях. Выполнен сравнительный анализ ультразвукового, ударно-импульсного и склерометрического методов, выявлены основные источники расхождения результатов. Систематизированы факторы, влияющие на точность градуировочных зависимостей: влажность бетона, его возраст и степень карбонизации. Предложены практические рекомендации по комплексному контролю, позволяющие повысить достоверность оценки прочности эксплуатируемых конструкций.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, прочность бетона, ультразвуковой метод, ударно-импульсный метод, склерометрия, градуировочная зависимость, карбонизация, метрология.

Ivanchuk Valeriya Romanovna
Student of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
ivanchuk.val@yandex.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. The problems associated with the practical application of non-destructive methods for monitoring the strength of concrete in structures are considered. A comparative analysis of the ultrasonic, impact-pulse, and sclerometric methods has been carried out, and the main sources of discrepancies in the results have been identified. The factors affecting the accuracy of calibration relationships have been systematized: the moisture content of the concrete, its age, and the degree of carbonation. Practical recommendations for comprehensive monitoring are proposed, which make it possible to increase the reliability of assessing the strength of structures in service.

Keywords: non-destructive testing, concrete strength, ultrasonic method, impact-pulse method, sclerometry, calibration relationship, carbonization, metrology.

Контроль прочности бетона в готовых конструкциях является одной из ключевых задач строительной диагностики. В отличие от лабораторных испытаний образцов, оценка прочности непосредственно в теле конструкции сопряжена с существенно большим числом неконтролируемых факторов. Именно здесь проявляется основное противоречие неразрушающего контроля: методы, демонстрирующие высокую сходимость в лабораторных условиях, дают значительный разброс на реальных объектах. От достоверности оценки прочности зависят решения о возможности дальнейшей эксплуатации конструкции, необходимости её усиления или демонтажа.

Согласно действующей нормативной базе, ультразвуковой метод определения прочности бетона регламентируется ГОСТ 17624-2012, который устанавливает требования к проведению измерений и построению градуировочных зависимостей [1]. Механические методы неразрушающего контроля, включая ударно-импульсный и склерометрический, регламентируются ГОСТ 22690-2015 [2]. Общие правила контроля и оценки прочности бетона закреплены в ГОСТ 18105-2018 [3]. Однако даже строгое соблюдение всех трёх стандартов не гарантирует получения результата, совпадающего с фактической прочностью бетона.

Каждый из трёх рассматриваемых методов основан на регистрации определённого физического параметра. Ультразвуковой метод базируется на измерении скорости распространения продольных упругих волн. Прочность бетона коррелирует с его плотностью и модулем упругости, которые определяют акустические характеристики материала. Метод чувствителен к

структуре бетона, наличию дефектов и армированию [4]. Ударно-импульсный метод основан на регистрации параметров упругого отклика поверхности бетона при дозированном ударе. Приборы этого типа фиксируют высоту отскока, время контакта или параметры затухания колебаний [2]. Метод локальный, характеризуется малой глубиной зондирования, что делает его чувствительным к состоянию поверхностного слоя. Склерометрический метод предполагает оценку сопротивления поверхностного слоя вдавливанию или царапанию [5]. В современной практике он используется ограниченно, преимущественно для предварительной оценки. Таблица 1 систематизирует ключевые характеристики методов с точки зрения их применимости в полевых условиях.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика неразрушающих методов контроля прочности бетона

Характеристика	Ультразвуковой метод	Ударно-импульсный метод	Склерометрический метод
Контролируемый параметр	Скорость ультразвука	Параметры упругого отскока	Сопротивление вдавливанию
Глубина зондирования	до 1–2 м (сквозное)	20–50 мм	5–15 мм
Чувствительность к армированию	Высокая	Низкая	Низкая
Чувствительность к влажности	Средняя	Высокая	Высокая
Воспроизводимость в лаборатории	Высокая	Средняя	Средняя
Воспроизводимость на объекте	Средняя	Низкая	Низкая

Влажность бетона является одним из наиболее значимых факторов, нарушающих корреляцию между косвенным показателем и прочностью. Для ультразвукового метода увеличение влажности приводит к росту скорости продольных волн: вода, заполняющая поры, имеет акустический импеданс, существенно отличающийся от воздуха. В результате влажный бетон демонстрирует более высокую скорость ультразвука при той же фактической прочности, что ведёт к завышению результата контроля. Величина завышения может достигать 10–15 % [6]. Для ударно-импульсных приборов картина обратная: влажный поверхностный слой снижает параметры отскока, что может привести к занижению прочности на 15–20 % [5]. Таким образом, влажность действует на разные методы в противоположных направлениях, что создаёт предпосылки для взаимной компенсации погрешностей при комплексном контроле.

Прочность бетона нарастает во времени, однако скорость ультразвука изменяется непропорционально. В раннем возрасте, до 7 суток, структура цементного камня ещё не сформирована, и корреляция между скоростью и прочностью выражена слабо. В возрасте 28 суток градуировочные зависимости, как правило, наиболее устойчивы [4]. При дальнейшей эксплуатации прочность растёт медленно, но скорость ультразвука может даже снижаться из-за развития микротрещин и деградации структуры [5]. ГОСТ 17624-2012 допускает использование универсальных градуировочных зависимостей, построенных по результатам испытаний конструкций в возрасте 20–30 суток [1]. Однако применение таких зависимостей к бетону иного возраста требует обязательной корректировки.

Карбонизация представляет собой процесс взаимодействия гидроксида кальция цементного камня с углекислым газом воздуха. Реакция приводит к образованию карбоната кальция, уплотняющего поверхностный слой. Для ударно-импульсных и склерометрических методов, работающих именно с поверхностью, это означает систематическое завышение прочности: карбонизированный слой твёрже, чем внутренние зоны бетона [7]. Глубина карбонизации за десятилетия эксплуатации может достигать 10–20 мм, то есть соизмеряться с глубиной зондирования ударно-импульсных приборов. Ультразвуковой метод менее чувствителен к карбонизации, поскольку регистрирует интегральные характеристики материала на базе прозвучивания [6]. Таблица 2 обобщает направленность искажений, вносимых каждым фактором.

Таблица 2 – Влияние дестабилизирующих факторов на результаты контроля

Фактор	Ультразвуковой метод	Ударно-импульсный метод	Склерометрический метод
Повышенная влажность	Завышение	Занижение	Занижение
Карбонизация поверхности	Незначительно	Завышение	Завышение
Возраст > 1 года	Нестабильно	Завышение	Завышение
Армирование в зоне контроля	Завышение	Не влияет	Не влияет

Практика диагностики реальных объектов показывает, что расхождение между результатами, полученными разными методами на одних и тех же участках, может достигать 25–30 % и более. Источники этого расхождения имеют двойственную природу. Первая группа причин связана с различием физических принципов. Ультразвук «видит» объём материала, ударно-импульсные приборы – приповерхностный слой. Если прочность бетона по глубине конструкции неоднородна, что типично для массивных элементов, методы априори дадут разные результаты [4]. Вторая группа причин – метрологическая. Каждый метод использует собственную градуировочную зависимость, построенную на ограниченной выборке образцов. Погрешность самой зависимости непосредственно транслируется в погрешность контроля. Согласно ГОСТ 17624-2012, при коэффициенте корреляции менее 0,7 применение зависимости не допускается, однако на практике проверить этот параметр для конкретной конструкции не всегда возможно [1]. Дополнительным источником расхождения является человеческий фактор: качество подготовки поверхности, точность установки датчиков, соблюдение временных интервалов между измерениями [8].

Для повышения достоверности оценки прочности бетона в конструкциях целесообразно придерживаться следующих принципов. Комплексирование методов является наиболее эффективным путём повышения достоверности. Сочетание ультразвукового и ударно-импульсного методов позволяет взаимно компенсировать их слабые стороны. Методологической основой может служить подход, при котором ультразвук используется для выделения зон с аномальными характеристиками, а ударно-импульсные измерения – для локальной верификации [8]. Обязательный учёт влажностного состояния предполагает, что перед контролем следует оценить степень водонасыщения конструкции. ГОСТ 17624-2012 предусматривает построение градуировочных зависимостей на образцах, находящихся в том же влажностном состоянии, что и контролируемая конструкция [1].

Контроль глубины карбонизации необходим при обследовании конструкций старше 5 лет. Целесообразно предварительно определять глубину карбонизированного слоя методом фенолфталеиновой пробы [7]. Если глубина карбонизации сопоставима с глубиной зондирования ударно-импульсного прибора, результаты последнего подлежат обязательной корректировке. Построение градуировочных зависимостей на «живых» конструкциях является наиболее надёжным путём. Отбор кернов или использование метода отрыва со скалыванием для привязки косвенных показателей к фактической прочности позволяет получить зависимость, отражающую конкретные условия данного объекта. ГОСТ 17624-2012 требует не менее 12 участков для построения зависимости, причём в выборку должны входить зоны с минимальными, максимальными и промежуточными значениями косвенного показателя [1]. Периодическая корректировка зависимостей необходима даже в тех случаях, когда исходная зависимость была построена корректно. Даже корректно построенная зависимость «стареет»: меняются условия эксплуатации, материалы, технология бетонирования. Стандарт предписывает корректировать зависимость не реже одного раза в месяц с добавлением не менее трёх новых результатов [1].

Неразрушающий контроль прочности бетона в конструкциях остаётся областью, где метрологическая строгость лабораторных методик неизбежно «размывается» многообразием реальных условий. Расхождения между ультразвуковым, ударно-импульсным и склерометрическим методами не являются дефектом какого-либо из них – это следствие различия физических принципов и чувствительности к дестабилизирующим факторам. Повышение достоверности контроля требует перехода от монометода к комплексной стратегии: сочетанию методов, учёту влажностного состояния, возраста и карбонизации бетона, построению «привязанных» к конструкции градуировочных зависимостей и их регулярной актуализации [8]. Такой подход соответствует и требованиям действующих стандартов, и практическим реалиям строительной диагностики.

Литература

1. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. – М. : Стандартинформ, 2014. – 21 с.
2. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – М. : Стандартинформ, 2016. – 24 с.
3. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – М. : Стандартинформ, 2018. – 16 с.
4. Особенности оценки качества железобетонных конструкций транспортного строительства неразрушающими методами контроля / Т.М. Петрова [и др.] // Современные технологии – транспорту. – 2023. – С. 46–52.
5. Коревицкая М.Г. Неразрушающие методы контроля качества строительных конструкций. – М. : Высшая школа, 2005. – 240 с.
6. Comparative Analysis of the Accuracy of NDTs in Determining Concrete Strength // IEEE. – 2025. DOI: 10.1109/... (уточнить по базе IEEE).

7. Influence of carbonation depth on concrete strength evaluation carried out using the SonReb method // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 45. – P. 47–55.
8. Monzheran D. Review of non-destructive analysis methods and their application for monitoring the durability of concrete structures // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2024. – Vol. 341. – № 5. – 29 p.

References

1. GOST 17624-2012. Concretes. Ultrasonic method for strength determination. – M. : Standartinform, 2014. – 21 p.
2. GOST 22690-2015. Concretes. Determination of strength by mechanical non-destructive testing methods. – M. : Standartinform, 2016. – 24 p.
3. GOST 18105-2018. Concretes. Rules for strength control and evaluation. – M. : Standartinform, 2018. – 16 p.
4. Specifics of Quality Assessment for Reinforced Concrete Structures in Transport Construction Using Non-Destructive Testing Methods / T.M. Petrova [et al.] // Modern Technologies for Transport. – 2023. – P. 46–52.
5. Korevitskaya M.G. Non-Destructive Methods for Quality Control of Building Structures. – M. : Vysshaya Shkola, 2005. – 240 p.
6. Comparative Analysis of the Accuracy of NDTs in Determining Concrete Strength // IEEE. – 2025. DOI: 10.1109/... (verify against the IEEE database).
7. Influence of carbonation depth on concrete strength evaluation carried out using the SonReb method // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 45. – P. 47–55.
8. Monzheran D. Review of non-destructive analysis methods and their application for monitoring the durability of concrete structures // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2024. – Vol. 341. – № 5. –29 p.

УДК 691.328.3

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ФИБРОБЕТОНЫ С ПОЛИМЕРНОЙ И СТАЛЬНОЙ ФИБРОЙ: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ И УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

♦♦♦♦♦

HIGH-STRENGTH FIBER-REINFORCED CONCRETES WITH POLYMER AND STEEL FIBERS: A COMPARATIVE ANALYSIS OF CRACK RESISTANCE AND IMPACT TOUGHNESS

Иванчук Валерия Романовна
студентка кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
ivanchuk.val@yandex.ru

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Аннотация. Высокопрочные бетоны обладают повышенной склонностью к хрупкому разрушению, что ограничивает их применение в конструкциях, работающих под динамическими и ударными нагрузками. Дисперсное армирование волокнами рассматривается как эффективное решение данной проблемы. В работе выполнен сравнительный анализ трещиностойкости и ударной вязкости фибробетонов со стальной и полимерной фиброй. Показано, что стальная фибра обеспечивает более высокие показатели статической трещиностойкости, тогда как полимерная фибра демонстрирует рост энергопоглощения при динамическом нагружении. Обоснованы области рационального применения каждого типа фибры и перспективность гибридного армирования.

Ключевые слова: фибробетон, стальная фибра, полимерная фибра, трещиностойкость, ударная вязкость, энергопоглощение, хрупкое разрушение, дисперсное армирование.

Ivanchuk Valeriya Romanovna
Student of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
ivanchuk.val@yandex.ru

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Annotation. High-strength concretes are prone to brittle failure, which limits their application in structures subjected to dynamic and impact loads. Dispersed fiber reinforcement is considered an effective solution to this problem. This paper presents a comparative analysis of the crack resistance and impact toughness of fiber-reinforced concretes containing steel and polymer fibers. It is shown that steel fibers provide superior static crack resistance, whereas polymer fibers demonstrate increased energy absorption under dynamic loading. The optimal application areas for each fiber type and the potential of hybrid reinforcement are discussed.

Keywords: fiber-reinforced concrete, steel fiber, polymer fiber, crack resistance, impact toughness, energy absorption, brittle failure, dispersed reinforcement.

Высокопрочные бетоны, применяемые в ответственных конструкциях, обладают существенным недостатком – склонностью к хрупкому разрушению. При достижении предельных напряжений такой бетон разрушается практически мгновенно, без предварительной деформации, что создаёт угрозу для безопасности сооружений, работающих под динамическими и ударными нагрузками. Дисперсное армирование волокнами является одним из наиболее эффективных способов решения этой проблемы. Введение фибры в бетонную матрицу создаёт пространственный каркас, который воспринимает растягивающие напряжения после образования трещин и обеспечивает работу материала в запредельной стадии деформирования [1] [2].

Два основных типа фибры, применяемых для армирования высокопрочных бетонов, – стальная и полимерная – принципиально различаются по механическим характеристикам и характеру взаимодействия с матрицей. Стальная фибра обладает высоким модулем упругости (190–210 ГПа) и прочностью на растяжение (600–3150 МПа), что обеспечивает эффективное восприятие растягивающих усилий в трещине [3][4]. Полимерная фибра, в частности полипропиленовая, характеризуется существенно более низким модулем упругости (35 ГПа) и прочностью (150–600 МПа), однако её относительное удлинение достигает 20–150 %, что на порядок превышает аналогичный показатель стали [4]. Это различие определяет разные механизмы диссипации энергии: стальная фибра работает преимущественно за счёт сопротивления выры-

ванию из матрицы, тогда как полимерная – за счёт вязкоупругого деформирования [3] [5]. Сравнительная характеристика ключевых параметров представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики стальной и полипропиленовой фибры

Показатель	Стальная фибра	Полипропиленовая фибра
Прочность на растяжение, МПа	600–3150	150–600
Модуль упругости, ГПа	190–210	35
Относительное удлинение, %	3–4	20–150
Плотность, г/см³	7,8	0,91
Стойкость к коррозии	Низкая	Высокая
Ориентировочная стоимость, €/кг	2,1	3,6

Экспериментальные исследования трещиностойкости демонстрируют преимущество стального армирования по критерию критического коэффициента интенсивности напряжений. При испытаниях балок с надрезом установлено, что добавление стальной фибры увеличивает прочность на растяжение в 3,5–4,5 раза, тогда как полипропиленовой – лишь в 2–2,5 раза [1]. Однако картина меняется при переходе от статических к динамическим нагрузкам. Исследования ударной вязкости показали, что при высокоскоростном нагружении энергопоглощающая способность полимерных фибр существенно возрастает, тогда как эффективность стальных волокон снижается [3]. Ударная вязкость балок со стальной фиброй при динамическом нагружении уменьшается по сравнению со статическими испытаниями, в то время как для полимерных фибр наблюдается обратная тенденция [3]. Это объясняется вязкоупругими свойствами полимеров: при быстром деформировании они проявляют более высокую эффективную жёсткость, а сцепление с матрицей усиливается [6].

Сравнительный анализ ударной вязкости обоих типов фибры представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная оценка ударной вязкости фибробетонов

Параметр	Стальная фибра	Полимерная фибра
Энергопоглощение при статическом изгибе	Высокое	Умеренное
Энергопоглощение при ударном нагружении	Снижается	Возрастает
Механизм диссипации энергии	Вырывание волокон	Вязкоупругое деформирование
Влияние скорости нагружения	Отрицательное	Положительное
Остаточная прочность после трещинообразования	Высокая	Средняя, но стабильная

Практические рекомендации по применению определяются условиями работы конструкции. Стальная фибра демонстрирует наилучшие результаты в конструкциях, требующих максимальной трещиностойкости и статической прочности: промышленные полы, мостовые настилы, аэродромные покрытия, тоннельные обделки [2] [4] [7]. Полимерная фибра, напротив, показывает преимущества при динамических и ударных воздействиях. Взрывоопасные и ударнонагруженные объекты, защитные сооружения, конструкции, подверженные импульсным нагрузкам, являются областью рационального применения полимерных фибр [3] [8]. Полипропиленовая фибра также эффективна в тонкостенных конструкциях сложной геометрии и в условиях агрессивных сред, где коррозионная стойкость полимера является решающим преимуществом [9] [10].

Перспективным направлением является гибридное армирование, сочетающее стальную и полимерную фибру. Комбинация макростальных и микрополимерных волокон позволяет одновременно обеспечить высокую трещиностойкость на макроуровне и блокировку микротрещин на ранних стадиях [6]. Оптимальные соотношения компонентов демонстрируют синергетический эффект, превосходящий характеристики моновидового армирования [6]. Гибридные системы особенно эффективны в конструкциях, подверженных комбинированному воздействию статических и динамических нагрузок [11].

Таким образом, выбор между стальной и полимерной фиброй определяется характером нагружения, условиями эксплуатации и требованиями к долговечности. Стальная фибра обеспечивает максимальную прочность и трещиностойкость в статических условиях, но уступает полимерной при ударных воздействиях. Полимерная фибра превосходит стальную по ударной вязкости при высокоскоростном нагружении и коррозионной стойкости, но уступает по абсолютным прочностным показателям. Рациональное проектирование фибробетонных конструкций требует учёта этой специфики и применения гибридных решений.

Литература

1. Кузнецов М.С. Анализ различных видов фибр // КиберЛенинка. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-razlichnyh-vidov-fibr (дата обращения 04.10.2026).
2. Сизяков И.Д. Трещиностойкость бетона со стеклопластиковой и стальной фиброй // КиберЛенинка. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/treschinostoykost-betona-so-stekloplastikovoy-i-stalnoy-fibroy (дата обращения 04.10.2026).
3. Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона / КиберЛенинка. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-harakteristik-treschinostoykosti-fibrobetona (дата обращения 04.10.2026).
4. Обиджонов Ж.Т. Научно-технические основы формирования свойств высокопрочного фибробетона при комбинированном дисперсном армировании. – Zenodo, 2025. – URL : https://zenodo.org/records/17266640 (дата обращения 04.10.2026).
5. Жаворонков М.И. Развитие методов определения характеристик трещиностойкости фибробетона : дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2019. – 156 с.
6. Трещиностойкость элементов зданий и сооружений, произведенных с использованием фибробетона : магистерская диссертация / Тольяттинский государственный университет. – Тольятти, 2021. – 89 с.
7. Метод расчета трещиностойкости тоннельных обделок кругового очертания из фибробетона с учетом взаимодействия с вмещающим грунтовым массивом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2020. – 24 с.
8. Патент № 2130378 Российская Федерация, МПК C04B 20/00. Способ комплексного армирования бетона неметаллическим волокном: заявл. 27.10.1997: опубл. 20.05.1999 / авторы и патентообладатели не указаны. – 4 с.
9. Bindiganavile V. Polymer and Steel Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Impact Loading. Part 2: Flexural Toughness / V. Bindiganavile, N. Banthia // ACI Materials Journal. – 2001. – Vol. 98. – № 1. – P. 17–24.
10. Experimental characterization of the post-cracking response in Hybrid Steel/Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete / A. Caggiano [et al.] // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 125. – P. 1035–1043.
11. Dynamic mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 490. – 142078.

References

1. Kuznetsov M.S. Analysis of various types of fibers // CyberLeninka. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-razlichnyh-vidov-fibr (date of application 04.10.2026).
2. Sizyakov I.D. Crack resistance of concrete with fiberglass and steel fibers // CyberLeninka. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/treschinostoykost-betona-so-stekloplastikovoy-i-stalnoy-fibroy (date of application 04.10.2026).
3. Experimental determination of crack resistance characteristics of fiber-reinforced concrete // CyberLeninka. – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-harakteristik-treschinostoykosti-fibrobetona (date of application 04.10.2026).
4. Obidzhonov Zh.T. Scientific and Technical Foundations for Developing the Properties of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Using Combined Dispersed Reinforcement. – Zenodo, 2025. – URL : https://zenodo.org/records/17266640 (date of application 04.10.2026).
5. Zhavoronkov M.I. Development of Methods for Determining the Crack Resistance Characteristics of Fiber-Reinforced Concrete : Dis. ... Candidate of Technical Sciences. – SPb., 2019. – 156 p.
6. Crack resistance of building and structure elements produced using fiber concrete: master's thesis / Tolyatti State University. – Tolyatti, 2021. – 89 p.
7. Method for calculating the crack resistance of circular tunnel linings made of fiber concrete, taking into account the interaction with the surrounding soil mass : abstract of dis. … candidate of technical sciences. – M., 2020. – 24 p.
8. Patent No. 2130378, Russian Federation, IPC C04B 20/00. Method for complex reinforcement of concrete with non-metallic fiber: application dated 27.10.1997; publication date 20.05.1999 / authors and patent holders not specified. – 4 p.
9. Bindiganavile V. Polymer and Steel Fiber-Reinforced Cementitious Composites under Impact Loading. Part 2: Flexural Toughness / V. Bindiganavile, N. Banthia // ACI Materials Journal. – 2001. – Vol. 98. – № 1. – P. 17–24.
10. Experimental characterization of the post-cracking response in Hybrid Steel/Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete / A. Caggiano [et al.] // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 125. – P. 1035–1043.
11. Dynamic mechanical properties of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 490. – 142078.

УДК 624.012.45:004.8

РАСПОЗНАВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА И ДЕФЕКТОВ ЗАМОНОЛИЧИВАНИЯ ОПОРНЫХ УЗЛОВ СТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ ПРОМЗДАНИЙ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

♦♦♦♦♦

RECOGNITION OF CORROSION WEAR AND BEDDING CONCRETE DEFECTS IN SUPPORT JOINTS OF INDUSTRIAL BUILDING ROOF TRUSSES USING COMPUTER VISION

Козуб А.П.
студент гр. 22-С-УС1,
Кубанский государственный технологический университет
alexkozubrou@bk.ru

Усанов С.В.
кандидат технических наук,
доцент,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Kozub A.P.
Student of group 22-S-US1,
Kuban State Technological University
alexkozubrou@bk.ru

Usanov S.V.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Аннотация. Предложена методика бесконтактной дефектоскопии опорных узлов сопряжения железобетонных стропильных конструкций с колоннами промышленных цехов. Сбор графических данных организован с уклоном на внутрицеховую специфику посредством съемки с телескопических углепластиковых мачт, оборудования мостовых кранов и компактных микрокоптеров в защитных каркасах. Сформулирован вычислительный алгоритм сегментации зон подливки бетона и стальных закладных деталей для определения ширины раскрытия микротрещин и площади коррозии. На основе сопоставления результатов натурных обследований и работы программного комплекса дана оценка точности и скорости работы предложенного подхода.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, опорные узлы, стропильные фермы, промышленные здания, компьютерное зрение, дефектоскопия, стальные закладные детали, внутрицеховой мониторинг.

Annotation. A method for non-contact flaw detection of support joints connecting reinforced concrete truss structures with columns of industrial workshops is proposed. The collection of graphical data is organized taking into account workshop-specific conditions using shooting from telescopic carbon-fiber masts, overhead crane equipment, and compact microcopters in protective frames. A computational algorithm for segmenting bedding concrete zones and embedded steel parts is formulated to determine microcrack opening width and corrosion area. Based on a comparison of field inspection results and software performance, an assessment of the accuracy and speed of the proposed approach is given.

Keywords: reinforced concrete structures, support nodes, roof trusses, industrial buildings, computer vision, flaw detection, embedded steel parts, in-shop monitoring.

Оценка фактического технического состояния узлов опирания стропильных и подстропильных железобетонных ферм на колонны остается одной из наиболее трудоемких задач при техническом обследовании одноэтажных промышленных зданий. Данные конструктивные элементы воспринимают постоянные нагрузки от собственного веса покрытия и длительные динамические воздействия от кранового оборудования тяжелого режима работы. Основная концентрация напряжений приходится на опорную площадку, состоящую из заделанных в бетон стальных закладных пластин, выравнивающего слоя подливки из мелкозернистого бетона и анкерных групп.

Многолетняя эксплуатация в условиях технологической запыленности, циклического изменения температурно-влажностного режима и постоянных вибраций приводит к накоплению усталостных повреждений. На практике это выражается в откалывании бетона замоноличивания, образовании силовых и усадочных трещин вдоль зоны контактного шва, а также развитии коррозионных процессов на стальных элементах [1]. Появление раскрытия трещин или деструкция слоя подливки снижают площадь опирания конструкции, что в крайних случаях создает условия для потери устойчивости опорного сечения по ГОСТ 31937-2024 [2]. Характерные повреждения зоны замоноличивания и закладных деталей опорного узла представлены на рисунке 1.

Визуально-измерительный контроль узлов на отметках 12–18 метров, но требует привлечения автогидроподъемников, сборки инвентарных лесов или полной остановки технологических пролетов [3]. В условиях действующих производств это влечет за собой существенные простои оборудование и высокие риски для персонала, выполняющего верхолазные работы. При этом естественная затененность подкровельного пространства и сложный доступ к задним граням опорных подушек нередко приводят к пропуску начальных стадий деструкции бетона с шириной раскрытия трещин менее 0,1 мм [3].



Рисунок 1 – Дефекты слоя подливки бетона и коррозионные повреждения стальных элементов в опорном узле железобетонной стропильной фермы

Специфика выполнения замеров внутри производственных помещений – интенсивная пылевая взвесь, конвекционные воздушные потоки и электромагнитное излучение – требует грамотного подбора носителей оптических систем [4]. Оптимальным решением для фиксации узлов без приостановки работы цеха выступает применение сменных модулей высокого разрешения с оптическим приближением до 50х. Данные модули размещаются на легких телескопических углепластиковых мачтах с раздвижкой до 18 метров, поворачиваемых оператором с отметки пола, а также закрепляются на ходовых тележках мостовых кранов или на портативных внутрицеховых микрокоптерах в замкнутых пластиковых кожухах, исключающих случайный контакт лопастей с фермами [4]. Пример организации дистанционного сбора графических данных в подкровельном пространстве цеха представлен на рисунке 2.

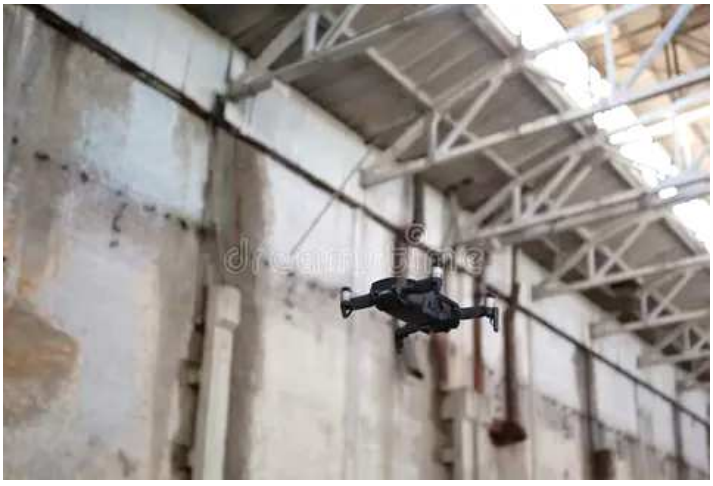


Рисунок 2 – Процесс дистанционной оптической фиксации опорного узла стропильной фермы в подкровельном пространстве промздания

Обработка снимков построена на совмещении методов предварительной фильтрации изображений и архитектур глубокого обучения. Алгоритм сегментации Mask R-CNN выделяет границы отдельных элементов узла, отделяя бетонное основание от металла закладной детали [5]. Выделенные области бетона проходят контурный анализ с привязкой пиксельной матрицы к физическим координатам через калибровочную сетку объектива. Это позволяет определять ширину раскрытия трещин начиная от 0,05 мм [5]. Для оценки состояния металла используется декомпозиция изображения в цветовые пространства HSV и LAB, где по отличию спектральных характеристик рассчитывается процентная доля поверхности, занятая окислами железа [6].

Практическое применение такого подхода в сравнении с классическим визуальным осмотром показала сокращение затрат времени на обследование одного пролета в 10–12 раз [7]. Сравнительная характеристика традиционного подхода и предложенного метода компьютерного зрения приведена в таблице 1. Выполнение съемочных операций с пола или с крановых путей полностью снимает вопросы верхолазной безопасности. Программный расчет исключает субъективный фактор при определении степени коррозионного износа стальных пластин, повышая точность оценки площади повреждения бетона и металла до 1 процента [7]. Собирае-

мый массив цифровых снимков позволяет вести хронологический мониторинг раскрытия трещин при повторных осмотрах, формируя объективную базу данных для принятия решений о сроках и способах усиления опорных узлов промышленных зданий [7].

Таблица 1 – Сравнительный анализ характеристик традиционного и предлагаемого методов обследования опорных узлов

Параметр оценки	Традиционный визуально-измерительный метод (ГОСТ 31937-2011)	Предлагаемый метод компьютерного зрения
Способ сбора первичных данных	Высотные верхолазные работы, монтаж инвентарных лесов, вышки-подъемники	Дистанционная съемка (телескопические мачты, микрокоптеры в кожухе, крановые PTZ-камеры)
Минимальная ширина раскрытия трещин	0,10–0,20 мм (при нормативной освещенности)	от 0,05 мм (за счет оптического зума и калибровки матрицы)
Оценка площади коррозионного износа	Субъективно-экспертная (с высокой погрешностью)	Автоматизированный цветностный расчет в пространстве HSV/LAB (точность до 1 %)
Время обследования 10 опорных узлов	6,0–8,0 часов	0,3–0,5 часа (включая этап нейросетевой обработки)
Необходимость остановки цеха / пролета	Требуется (для безопасного размещения подъемников)	Не требуется (работы выполняются без приостановки производства)
Фактор риска для персонала	Высокий (работы на высоте 12–18 метров)	Нулевой (оператор находится на отметке пола)

Литература

1. Добросмыслов Э.В. Диагностика повреждений несущих железобетонных конструкций зданий и сооружений. – М. : Издательство АСВ, 2020. – 256 с.
2. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : ФГБУ «РСТ», 2024. – 92 с.
3. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с изменениями № 1, 2). – М. : Стандартинформ, 2019. – 125 с.
4. Клюев С.В. Компьютерное зрение и искусственный интеллект в задачах дефектоскопии строительных конструкций / С.В. Клюев, А.Г. Юрьев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 3. – С. 32–41.
5. Алексейцев А.В. Оптимальный структурно-параметрический синтез систем усиления металлических и железобетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – № 3. – С. 210–218.
6. Акимов П.А. Применение методов машинного обучения для оценки надежности и технического состояния несущих каркасов / П.А. Акимов, А.С. Морозов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2025. – № 1. – С. 12–19.
7. Artificial intelligence for design of spatial structures and joints: A state-of-the-art review // Journal of Building Engineering. – 2026. – Vol. 98. – DOI: 10.1016/j.jobe.2026.112087

References

1. Dobrosmyslov E.V. Diagnostics of Damage to Load-Bearing Reinforced Concrete Structures of Buildings and Structures. – M. : ASV Publishing House, 2020. 256 p.
2. GOST 31937-2024. Buildings and Structures. Rules for Inspection and Technical Condition Monitoring. – M. : FGBU «RST», 2024. – 92 p.
3. SP 63.13330.2018. Concrete and Reinforced Concrete Structures. General Provisions. SNiP 52-01-2003 (with Amendments № 1, 2). – M. : Standartinform, 2019. – 125 p.
4. Klyuev S.V. Computer Vision and Artificial Intelligence in Flaw Detection of Building Structures / S.V. Klyuev, A.G. Yuriev // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2024. – № 3. – P. 32–41.
5. Alekseytsev A.V. Optimal Structural-Parametric Synthesis of Strengthening Systems for Metal and Reinforced Concrete Structures. Structural Mechanics of Engineering Structures and Buildings. – 2020. – № 3. – P. 210–218.
6. Akimov P.A. Application of Machine Learning Methods to Assess the Reliability and Technical Condition of Load-Bearing Frames / P.A. Akimov, A.S. Morozov // Structural Mechanics and Analysis of Structures. – 2025. – № 1. – P. 12–19.
7. Artificial intelligence for design of spatial structures and joints: A state-of-the-art review // Journal of Building Engineering. – 2026. – Vol. 98. DOI: 10.1016/j.jobe.2026.112087

УДК 629.369:69.002.5:693.556

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОБЕТОНОСМЕСИТЕЛЕЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

♦♦♦♦♦

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF AUTOMATED CONCRETE MIXERS USING THE METHOD OF ANALYZING THE DURATION OF THE WORK PROCESS

Кустарёв Геннадий Владимирович
кандидат технических наук,
вице-президент,
Российская инженерная академия
proektdm@mail.ru

Данилов Роман Геннадиевич
кандидат технических наук,
начальник отдела Центра «СТС»,
Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
rgdanilov@yandex.ru

Андрюхов Никита Михайлович
кандидат технических наук,
доцент,
заведующий лабораторией физического моделирования кафедры ПРАДМ,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет
andryukhov_nm@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены методы определения оптимальных параметров автобетоносмесителей с помощью математических моделей продолжительности рабочего цикла и теории подобия на основе анализа математических моделей продолжительности рабочего цикла и теории подобия проектируемого изделия и существующих высокоэффективных образцов техники. Приведены графики, полученные по предложенным методам, демонстрирующие наличие оптимальных зон эффективного использования автобетоносмесителей в определенных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: автобетоносмесители, оптимальные параметры, мощность двигателя, вместимость по выходу готовой смеси, полная масса.

Kustarev Gennady Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Vice President,
Russian Engineering Academy
proektdm@mail.ru

Danilov Roman Gennadievich
Candidate of Technical Sciences,
Head of Department of the Center «STS»,
Central Scientific Research Automobile and Automotive Engine Institute «NAMI»
romdanilov@mail.ru

Andryukhov Nikita Mikhailovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Laboratory of Physical Modeling of the Department of PRADM,
Moscow Automobile and Road State Technical University
andryukhov_nm@mail.ru

Annotation. The article considers methods for determining the optimal parameters of concrete mixer trucks using mathematical models of the duration of the working cycle and similarity theory based on the analysis of existing highly efficient models of equipment. The graphs obtained using the proposed methods are presented, demonstrating the presence of optimal zones for the efficient use of concrete mixer trucks.

Keywords: concrete mixer trucks, optimal parameters, engine power, finished mix output capacity, total weight.

Автобетоносмесители находят широкое применение в индустриальном, гражданском и дорожном строительстве. Выбор автобетоносмесителей из имеющихся в парке в зависимости от условий эксплуатации является важной производственной задачей. На этапе создания новой техники большое значение имеет обоснованное определение главных технических параметров машины. Применение техники с оптимальными параметрами представляет существенный резерв интенсификации строительства. На рынке техники потребитель стремится приобрести не только надежную машину, необходимую для выполнения соответствующих строительных работ, но и необходима машина с оптимальными параметрами, обеспечивающими работу в заданных конкретных условиях эксплуатации с наибольшим эффектом.

Методы определения и выбора оптимальных параметров в зависимости от условий работы основывается на анализе системы показателей, обеспечивающих объективную оценку полученного решения. Анализ математических моделей продолжительности рабочего цикла подробно изложен в работах профессора В.И. Баловнева [1, 2].

Математическую модель продолжительности рабочего цикла автобетоносмесителя $t_ц$ устанавливают на основе анализа структурной модели рабочего цикла.

Процесс приготовления бетонной смеси протекает одновременно с движением машины. При совмещенном, одновременном, параллельном протекании операций продолжительность рабочего цикла равна продолжительности каждой из операций.

$$t_ц = t_{пер} = t_{см}, \text{ с}, \quad (1)$$

где $t_{пер}$ – продолжительность операции транспортировки смеси, с; $t_{см}$ – продолжительность операции смешивания материала, с.

Время отдельных операций определяется известным соотношением:

$$t_i = \sum \frac{A_i}{N_i}, \text{ с}, \quad (2)$$

где A_i – математическая модель работы сил сопротивления при выполнении соответствующей операции, Нм; N_i – математическая модель мощности, которая может быть реализована машиной при выполнении соответствующей операции, Вт.

Автобетоносмеситель в системе производства следует рассматривать как транспортно-технологическую машину, выполняющую две основные операции: «транспортно-рабочую» по транспортировке и приготовлению смеси и «транспортно-холостую», заключающуюся в выполнении операции возвращения незагруженной машины за новой порцией материала.

Смесительный барабан перемешивает и гомогенизирует цементобетонную смесь. Схема работы лопасти смесителя и реологическая модель напряжённого состояния материала перед лопастью барабана приведена на рисунке 1.

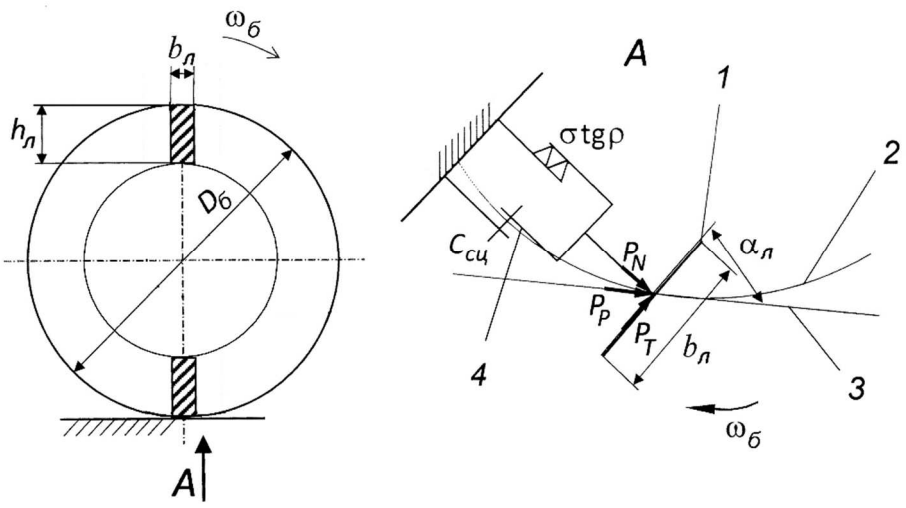


Рисунок 1 – Схема и реологический эквивалент процесса работы лопасти смесительного барабана:
1 – лопасть смесительного барабана; 2 – траектория движения лопасти смесителя;
3 – касательная к траектории движения лопасти в точке контакта; 4 – реологическая модель напряжённого состояния материала в точке контакта лопасти со средой

Лопасти барабана выполняют в процессе работы практически две операции: захватывают, перемешивают и перемещают материал вдоль оси барабана. Лопасти следует рассматривать в качестве рабочего органа совмещённого действия. Существующие методы расчёта гравитационных смесителей не учитывают ряд особенностей совмещённой работы лопастей.

Процессы захвата и смешения материала требуют наличия на валу смесительного барабана значительного крутящего момента, необходимого для преодоления возникающих сопротивлений, и могут эффективно протекать при малых оборотах барабана. Процесс перемещения материала в барабане не требует больших крутящих моментов и эффективно протекает при небольших частотах вращения барабана. Это обстоятельство в существующих методах расчёта не принимается во внимание, что приводит к погрешностям. Важно оптимизировать технические параметры процесса и режимы работы.

Силы сопротивления, действующие на лопасть смесителя при работе на смешивание и транспортирование смеси, определяются методами анализа реологической модели напряжённого состояния пластической среды со сцеплением [3]. Сопротивление захвата, смешение материала и сопротивление его перемещения внутри барабана действуют по касательной к траектории движения лопасти и в направлении оси лопасти. Лопасть, закреплённая на барабане, совершает круговое движение вокруг оси барабана.

Сопротивление при захвате и перемешивании материала рассматривается в соответствии со схемой процесса работы лопасти и принятой реологической модели напряжённого состояния материала, которая приведена на рисунке 1.

Величина сил сопротивления смешения и захвата материала с учётом сил трения определяется выражением:

$$P_{см} = P_N (\sin \alpha_л + \cos \alpha_л \operatorname{tg} \rho), \text{ Н}. \quad (3)$$

где $\alpha_л$ – угол установки лопасти к направлению вектора движения; tg ρ – коэффициент трения.

Здесь первое слагаемое определяет силы сопротивления захвата и смешения материала, второе силы трения. Сопротивление захвата определяется величиной напряжения сдвига в зоне контакта лопасти с материалом, силами трения призмы материала о лопасть.

Величина P_N – сопротивление сдвигу, действующая по нормали к поверхности лопасти, контактирующей с материалом. Сила P_N определяется предельным напряжением материала сдвигу τ. Для одной лопасти:

$$P_N = \tau \cdot F_л, \quad (4)$$

где $F_л$ – площадь лопасти, контактирующая с материалом, которая может иметь различную конфигурацию, м^2.

Для лопастей прямоугольной формы:

$$P_N = \tau \cdot b_л \cdot h_л, \text{ Н}, \quad (5)$$

где τ – касательное напряжение сдвига, Н/м^2; $b_л$ и $h_л$ – ширина и высота лопасти, м.

Касательное напряжение сдвига для материала с трением и сцеплением определяется реологической моделью вида:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg}\rho + C_{сц}, \text{ Н}, \quad (6)$$

где σ – нормальное напряжение сжатия, Н/м^2; tgρ – коэффициент трения частиц материала; $C_{сц}$ – сцепление материала при сдвиге, Н/м^2.

Величина σ определяется объемом материала, находящегося перед лопастью:

$$\sigma = \frac{q_м \cdot \gamma_м}{b_л \cdot h_л}, \quad (7)$$

где $q_м$ – объём материала перед лопастью, м^3; $\gamma_м$ – объёмный вес материала, Н/м^3.

Время отдельной операции машины в виде аналитической функции независимых аргументов, характеризующих технико-эксплуатационные параметры объекта, рассчитывают на основании отношения математических моделей работы сил сопротивлений $A_{сопр\ i}$, преодолеваемых при выполнении операции, к мощности $N_{сопр\ i}$, которая может быть реализована на выполнении операции.

Продолжительность смешения материала:

$$t_{см} = \frac{A_{см}}{N_{см}},$$

где $A_{см}$ – работа сил сопротивления при смешивании материала, Дж; $N_{см}$ – мощность на смешивание, Вт.

$$A_{см} = P_{см} \cdot l_{см}, \quad (8)$$

где $P_{см}$ – сила сопротивления при смешении материала, Н; $l_{см}$ – путь движения лопасти за один оборот барабана, м.

Путь $l_{см}$ равен шагу лопастей, располагающихся по винтовой линии:

$$l_{см} = 2\ D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha_л, \quad (9)$$

где $\alpha_л$ – угол наклона винтовой линии лопасти, °; $D_б$ – диаметр барабана, м.

На основании (8) работа сил сопротивления при перемешивании определяется зависимостью:

$$A_{см} = 2\ C_{сц} \cdot K_{\alpha\, см} \cdot b_л \cdot h_л \cdot D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha_л \cdot z_л, \quad (10)$$

где $K_{\alpha\, см} = \sin \alpha_л + \operatorname{tg} \rho \cdot \cos \alpha_л$ – безразмерный коэффициент влияния угла установки лопасти к направлению движения и трения, K_α = 1,1…1,36.; $z_л$ – количество лопастей в барабане.

Мощность на смешивание определяется:

$$N_{см} = M_{см} \cdot \varphi_л, \text{ Вт}, \quad (11)$$

где $M_{см}$ – крутящий момент на валу барабана, Нм; $\varphi_б$ – угловая скорость вращения смесительного барабана, $с^{-1}$.

Величина четвёртой координаты (продолжительности) операции захвата и смешения материала в барабане определятся по формуле:

$$t_{см} = \frac{2 \cdot C_{сц} \cdot K_{\alpha\, см} \cdot b_л \cdot h_л \cdot D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha_л \cdot z_л}{M_{см} \cdot \omega_л}, \text{с}. \quad (12)$$

На основании условия оптимальной продолжительности процессов смешения и перемещения материала $t_{см} = t_{пер}$ получают уравнение:

$$\frac{2 \cdot C_{сц} \cdot K_{\alpha\, см} \cdot b_л \cdot h_л \cdot D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha_л \cdot z_л}{M_{см} \cdot \omega_л} = \frac{M_{пер} \cdot 2\pi}{N_{пер}}. \quad (13)$$

Оптимальная величина момента на валу смесительного барабана:

$$M_{см\ опт} = \left(\frac{N_{пер} \cdot C_{сц} \cdot K_{\alpha\, см} \cdot b_л \cdot h_л \cdot D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha_л \cdot z_л}{\pi \cdot \omega_л} \right)^{1/2}, \text{ Нм}. \quad (14)$$

На основании (11) получаем:

$$M_{см\ опт} = \frac{C_{сц} \cdot K_{\alpha\, см} \cdot b_л \cdot h_л \cdot D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha_л \cdot z_л}{\pi}, \text{ Нм}. \quad (15)$$

На основании (15) определяют мощность для смешивания:

$$N_{см\ опт} = \frac{C_{сц} \cdot K_{\alpha\, см} \cdot b_л \cdot h_л \cdot D_б \cdot \operatorname{tg} \alpha_л \cdot z_л \cdot \omega_б}{\pi}, \text{ Вт}. \quad (16)$$

Продолжительность передвижения автобетоносмесителя от цементобетонного завода к строительной площадке:

$$t_ц = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_i}{N_i} = \frac{A_{см}}{N_{см}} + \frac{A_м}{N_м}, \text{ с}, \quad (17)$$

где $A_{см}$, $A_м$ – математические модели работы сил сопротивления, преодолеваемых машиной при транспортировании смеси и передвижении снаряженной машины, Нм; N_p, N_x – математические модели мощности, которая может быть реализована машиной при транспортировании смеси и передвижении снаряженной машины, Вт.

Математическая модель работы сил сопротивления при транспортировании смеси к строительной площадке:

$$A_{см} = q \cdot \gamma \cdot g \cdot f \cdot l \cdot k_1. \quad (18)$$

Математическая модель работы сил сопротивления при движении снаряженной машины:

$$A_м = m_м\, g \cdot f \cdot l \cdot k_2. \quad (19)$$

Мощность на транспортировку смеси:

$$N_{см} = m_м\, g \cdot v_р \cdot \varphi_с \cdot k_ф \cdot k_р. \quad (20)$$

Мощность на реализацию движения машины без смеси (холостой ход):

$$N_м = N \cdot k_x, \quad (21)$$

где f – коэффициент сопротивления движению ведущего колеса с дорогой; φ_c – коэффициент сцепления колеса с дорогой; k_φ – коэффициент распределения сцепного веса на ведущие колеса; $k_2 = N/m_м$ – размерный коэффициент подобных преобразований энергонасыщенность (удельная мощность) автобетоносмесителя, принимает значение k_2 = 20…30 Вт/кг; l – дальность передвижения автобетоносмесителя, м; q – вместимость барабана по выходу готовой смеси, м^3; γ – плотность смеси, кг/м^3; $m_м$ – снаряженная масса автобетоносмесителя, кг; N – мощность двигателя, Вт; g – ускорение свободного падения, м/с^2; k_x – аналитическо-экспериментальный безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации при передвижении снаряженной машины, $k_x = k_\varphi\,(1 - f \pm i)(1 - \delta)\,\eta \cdot k_{зд.х}$.

Время транспортирования смеси на основании (17), (18), (19):

$$t_{см} = \frac{q \cdot \gamma \cdot f \cdot l \cdot k_1}{m_м \cdot \varphi_c \cdot v_p \cdot k_\varphi \cdot k_p}, \text{ с.} \tag{22}$$

Продолжительность движения снаряженной машины:

$$t_м = \frac{m_м g \cdot f \cdot l \cdot k_2}{N \cdot k_x}, \text{ с.} \tag{23}$$

Продолжительность рабочего движения автобетоносмесителя:

$$t_p = \frac{q \cdot \gamma \cdot f \cdot l \cdot k_1}{m_м \cdot \varphi_c \cdot v_p \cdot k_\varphi \cdot k_p} = \frac{m_м g \cdot f \cdot l \cdot k_2}{N \cdot k_x}, \text{ с.} \tag{24}$$

На основании условия оптимальной продолжительности процессов передвижения смеси и машины $t_{см} = t_p$ получают уравнение:

$$\frac{q \cdot \gamma \cdot k_1}{m_м \cdot \varphi_c \cdot v_p \cdot k_\varphi \cdot k_p} = \frac{m_м g \cdot k_2}{N \cdot k_x}. \tag{25}$$

Оптимальная величина мощности двигателя автобетоносмесителя при движении с бетонной смесью:

$$N = \frac{m_м^2 g \cdot \varphi_c \cdot v_p \cdot k_\varphi \cdot k_p \cdot k_2}{q \cdot \gamma \cdot k_1 \cdot k_x}, \text{ кВт.} \tag{26}$$

Мощность в рабочем режиме с учетом вращения барабана:

$$N = \frac{m_м^2 g \cdot \varphi_c \cdot v_p \cdot k_\varphi \cdot k_p \cdot k_2}{q \cdot \gamma \cdot k_1 \cdot k_x} + \frac{C_{сц} \cdot K_{\alpha\,см} \cdot b_л \cdot h_л \cdot D_б \cdot \mathrm{tg}\alpha_л \cdot z_л \cdot \omega_б}{\pi}. \tag{27}$$

Продолжительность рабочего цикла автобетоносмесителя можно представить в виде ряда слагаемых:

$$t_ц = t_{заг} + t_{пер} + t_{ман} + t_{разг} + t_{пр} + t_x, \text{ с,} \tag{28}$$

где $t_{заг}$ – продолжительность операции загрузки барабана сухими компонентами, с; $t_{ман}$ – продолжительность операции маневрирования машины на строительной площадке, с; $t_{разг}$ – продолжительность операции разгрузки смеси, с; $t_{пр}$ – продолжительность промывки барабана, с; t_x – продолжительность операции возвращения машины без смеси к месту загрузки, с.

При формировании математических моделей продолжительности рабочего процесса требуется оценить влияние на время цикла вспомогательных операций и, прежде всего, операции по загрузке барабана, а также влияние замедления при движении машины особенно в черте города. Рабочий цикл автобетоносмесителя не допускает наличия простоев.

Тягово-энергетические параметры автобетоносмесителей определяются в основном режимами протекания основных операций рабочего цикла: транспортно-рабочих и транспортно-холостых.

Продолжительность рабочего цикла $t_ц$ является важным показателем эффективности работы автобетоносмесителя. От продолжительности рабочего цикла машины зависят другие важные показатели эффективности рабочего процесса (энергоемкость, материалоемкость, себестоимость единицы продукции и прибыль).

Для получения оптимальных значений технических параметров в зависимости от условий эксплуатации использован метод анализа математической модели четвертой координаты (продолжительности) рабочего процесса технологической машины. Автобетоносмеситель рассматривается как транспортно-технологическая машина [4]. Продолжительность операций рабочего цикла должна быть наименьшей. Технические параметры машины должны обеспечивать это условие.

Математическая модель продолжительности рабочего цикла формируется на базе отношения (16).

Продолжительность рабочей операции

$$t_p = \frac{q \cdot \gamma \cdot f \cdot l_p \cdot k_1}{m_м \cdot \varphi_c \cdot v_p \cdot k_\varphi \cdot k_p}, \text{ с.} \quad (29)$$

Продолжительность холостого движения:

$$t_x = \frac{m_м g \cdot f \cdot l_x \cdot k_2}{N \cdot k_x}, \text{ с.} \quad (30)$$

Продолжительность рабочего цикла автобетоносмесителя:

$$t_p = \frac{q \cdot \gamma \cdot f \cdot l_p \cdot k_1}{m_м \cdot \varphi_c \cdot v_p \cdot k_\varphi \cdot k_p} + \frac{m_м g \cdot f \cdot l_x \cdot k_2}{N \cdot k_x}, \text{ с.} \quad (31)$$

Первый член уравнения определяет продолжительность операции по транспортированию бетонной смеси, второе слагаемое определяет время перемещения снаряженной машины при рабочем и холостом ходе.

Анализ математической модели продолжительности рабочего цикла автобетоносмесителя (31) показывает, что величина $t_ц$ зависит от массы машины. С увеличением снаряженной массы первый член выражения уменьшается, а второй – наоборот увеличивается.

Оптимальное значение снаряженной массы автомобиля определяется на основании соотношения $dt_ц/dm_м = 0$ или:

$$m_{м\ опт} = \left(\frac{q \cdot \gamma \cdot N \cdot f \cdot l_p \cdot k_1 \cdot k_x}{g \cdot v_p \cdot f \cdot \varphi_c \cdot l_x \cdot k_\varphi \cdot k_2 \cdot k_p} \right)^{1/2}, \text{ кг,} \quad (32)$$

где f – коэффициент сопротивления движению ведущего колеса с дорогой; φ_c – коэффициент сцепления колеса с дорогой; k_φ – коэффициент распределения сцепного веса на ведущие колеса; l_p – дальность рабочего перемещения полностью загруженного автобетоносмесителя, м; l_x – дальность холостого перемещения незагруженной машины, м; q – вместимость барабана по выходу готовой смеси, м^3; γ – плотность смеси, кг/м^3; $m_{пл}$ – полная масса автобетоносмесителя, кг; $m_м$ – снаряженная масса автобетоносмесителя, кг; N – мощность двигателя, Вт; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $k_{сн}$ – безразмерный коэффициент подобных преобразований параметров, принимает значение $k_{сн}$ = 2,0…3,5; k_p – аналитическо-экспериментальный безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации при рабочем перемещении:

$$k_p = k_\varphi\ (1 - f \pm i)(1 - \delta)\ \eta \cdot k_{зд.р},$$

где f – коэффициент сопротивления передвижению автобетоносмесителя с учетом сопротивления воздуха, $f = f_{тр} \cdot k_{вз}$, принимает значение $f_{тр}$ = 0,02… 0,05; $k_{вз}$ – коэффициент влияния сопротивления воздуха, $k_{вз}$ = 1,5…2,5; i – уклон местности; δ – коэффициент буксования; η – КПД трансмиссии; $k_{зд.р}$, $k_{зд.х}$ – коэффициент загрузки двигателя при рабочем и холостом перемещении соответственно; принимает значение 0,57…0,8; k_x – аналитическо-экспериментальный безразмерный коэффициент, зависящий от условий эксплуатации при холостом передвижении.

График изменения времени следования автобетоносмесителя на строительный участок от массы имеет место при определенной величине полной массы. Оптимальное значение массы зависит от дальности транспортировки и величины холостого пробега. При значительных холостых пробегах оптимальное значение массы автобетоносмесителей снижается и наоборот, для машин с малой массой – энергонасыщенность растет.

Минимальная продолжительность рабочего и холостого движения машины определяется путем подстановки $m_{м\ опт}$ (32) в формулу (31). Продолжительность движения определяем по формуле:

$$t_{ц\,min} = 2\left(\frac{q\gamma \cdot g \cdot f \cdot l_p \cdot l_x \cdot k_1 \cdot k_2}{N \cdot v_p \cdot \varphi_c \cdot k_\varphi \cdot k_x \cdot k_p}\right)^{1/2}, \text{ кг.} \quad (33)$$

Оптимальная вместимость барабана:

$$q = \frac{m^2_{м\ опт} \cdot v_p \cdot g \cdot f \cdot \varphi_c \cdot k_\varphi \cdot l_x \cdot k_p \cdot k_2}{\gamma \cdot N \cdot l_p \cdot k_x \cdot k_1}, \text{ м}^3. \quad (34)$$

Рациональный скоростной режим автобетоносмесителя с учетом рабочих и транспортных операций определяется по скорости движения:

$$v_p = \frac{N \cdot q \cdot \gamma \cdot l_p \cdot k_x}{m^2{}_м \cdot g \cdot f \cdot \varphi_c \cdot l_x \cdot k_p}, \text{ м/с.} \quad (35)$$

Эксплуатационная производительность автобетоносмесителей:

$$П = q\, k_в \cdot k_и \cdot 60/t_ц, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (36)$$

где q – вместимость барабана по выходу готовой смеси, м^3; $t_ц$ – средняя продолжительность рабочего цикла машины, мин; $k_в$ – коэффициент использования машины по времени; $k_и$ – коэффициент использования парка машин.

Графики на рисунках 2–8 показывают, что машины с определенными техническими параметрами (m, N, q) позволяют получить эффективный результат в определенных условиях работы (рабочий хода l_p, холостой ход l_x, v_p, φ_c, f и др.). В других условиях эффективность машин снижается. Следует подчеркнуть, что машины с более высокими энергетическими параметрами имеют более широкий диапазон рабочих условий, в которых машина дает высокий или близкий к наибольшему эффект. Машины имеют более широкий спектр условий оптимального применения.

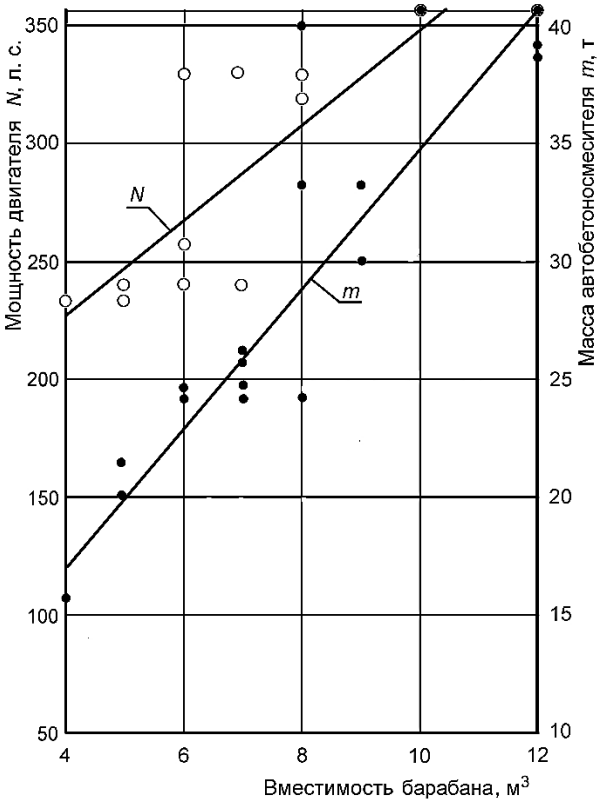


Рисунок 2 – Изменение мощности двигателя и массы автобетоносмесителя от вместимости барабана по выходу готовой смеси

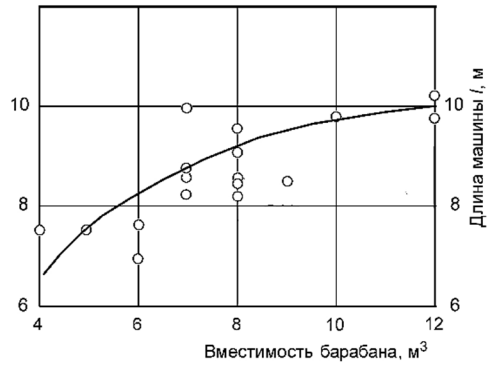


Рисунок 3 – Изменение длины автобетоносмесителя в зависимости от вместимости смесительного барабана

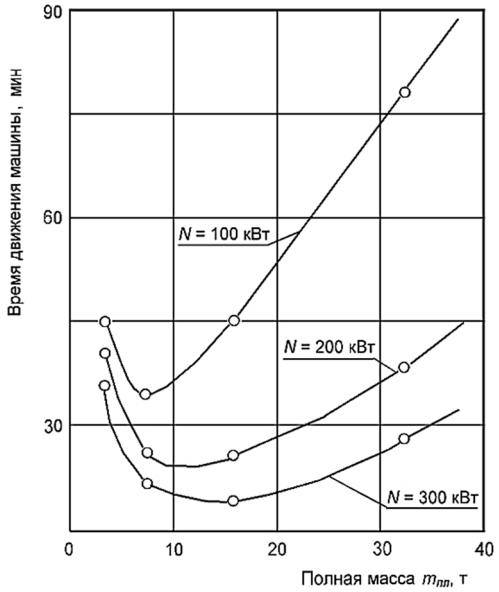


Рисунок 4 – Изменение времени движения от полной массы автобетоносмесителя при средней скорости движения 40 км/ч, объеме барабана 4 м^3 и дальности передвижения 18 км

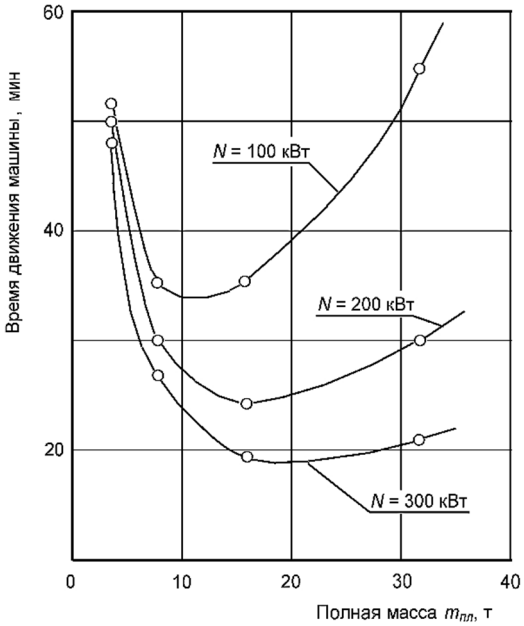


Рисунок 5 – Изменение времени движения от массы автобетоносмесителя при средней скорости движения 40 км/ч, объеме барабана 8 м^3 и дальности передвижения 18 км

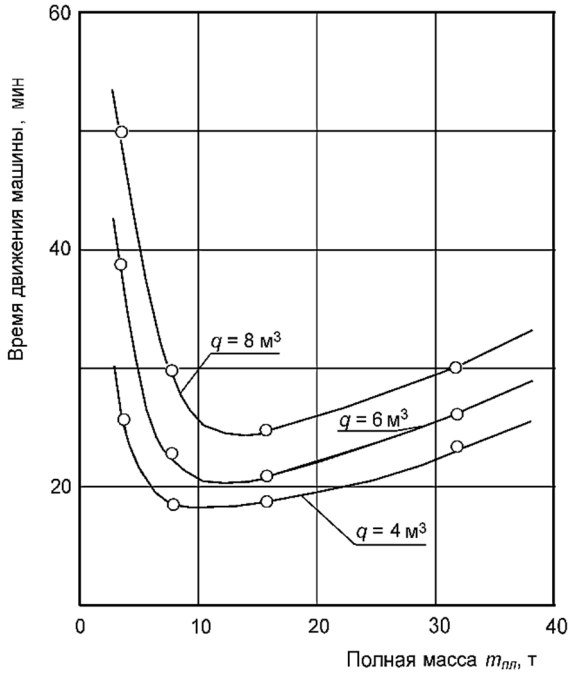


Рисунок 6 – Изменение времени движения от объема смесительного барабана и полной массы автобетоносмесителя при средней скорости движения 40 км/ч, мощности 200 кВт и дальности передвижения 18 км

На графиках (рис. 7, 8) показано, что для автобетоносмесителей оптимальная дальность (радиус действия) имеет оптимальную область для машин с определенными техническими параметрами.

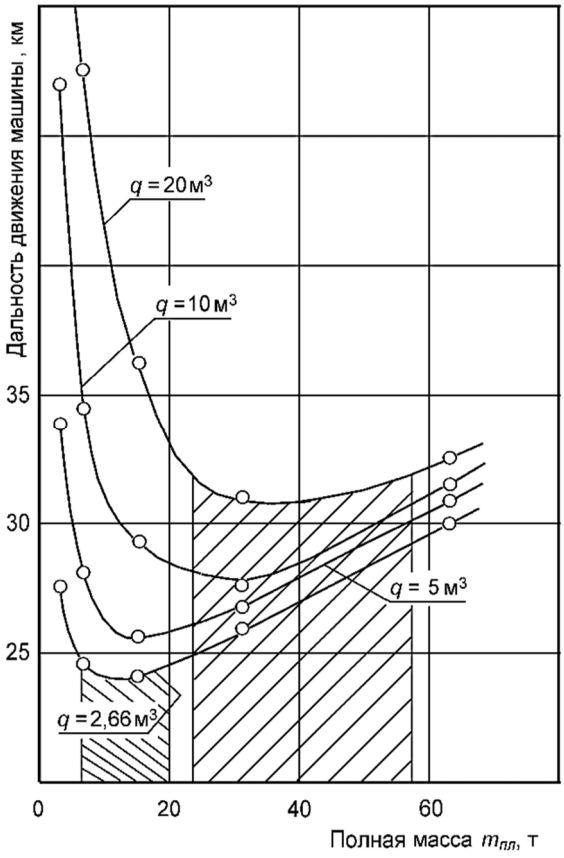


Рисунок 7 – Изменение дальности передвижения от полной массы и вместимости барабана машины при скорости движения 60 км/ч и мощности 230 кВт

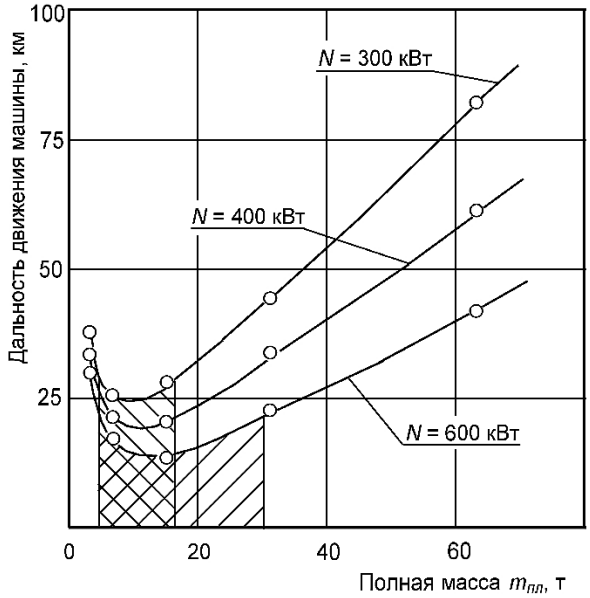


Рисунок 8 – Изменение дальности передвижения от полной массы и мощности двигателя машины при скорости движения 60 км/ч и объеме барабана 9 м^3

Предложенные математические модели позволяют определить оптимальные технические параметры автобетоносмесителей или решить обратную задачу по определению места расположения цементобетонных заводов в определенном удалении от объектов строительства. Из графиков следует, что более энергонасыщенные и грузоподъемные машины имеют более широкую зону оптимального применения. Зона оптимальной дальности рабочего цикла на графиках (рис. 7, 8) заштрихована. Машины могут работать и за пределами оптимальной зоны, но эффект будет существенно ниже (расход топлива выше, время движения больше).

Графики построены по зависимостям, полученным на основании анализа законов механики и теории подобия технических систем. Нет необходимости использования методов регрессионного анализа по двум причинам. Связи между параметрами установлены на основании законов механики, что дает возможность определить причинно-следственные связи между параметрами. Регрессионные зависимости отражают следствие процесса и не раскрывают причины и характер протекания самого явления. Регрессионные зависимости используются при анализе процессов, для которых аналитические закономерности не установлены. Например, при установлении рыночных связей между параметрами и стоимостью машин. Однако в этом случае регрессионные зависимости фиксируют следствие, не вскрывая причины протекания рыночного процесса и рыночных закономерностей.

Рассмотренные положения показывают, что для автобетоносмесителей между главными техническими параметрами m, N, q, T, l и др. имеют место отношения, характеризующиеся соответственными масштабными коэффициентами.

На этапе проектирования установленные технические параметры машины m, N, $П$ являются исходной базой для проведения предварительных расчетов (тягово-динамических, энергетических, прочностных, экологических, технико-экономических и других).

На этапе эксплуатации предложенный метод позволяет установить рациональное значение основных технических параметров автобетоносмесителя m, N, $П$, по которым осуществляется выбор машины в зависимости от конкретных условий эксплуатации.

Литература

1. Баловнев В.И. Оптимизация и выбор инновационных систем и процессов транспортно-технологических машин : учеб. пособие. – М. : Техполиграфцентр, 2014. – 392 с.
2. Дорожно-строительные машины и комплексы : Учебник для вузов по спец. «Строительные и дорожные машины и оборудование» / В.И. Баловнев [и др.]; Под общ ред. В.И. Баловнева, С.Н. Глаголева. – 3-е изд., перераб. и доп. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2020. – 523 с.
3. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1994. – 432 с.
4. Кустарев Г.В. Автобетоносмесители. Устройство, основы расчета : учеб. пособие / Г.В. Кустарёв, Р.Г. Данилов, Н.М. Андрюхов; Под общ. ред. проф. Г.В. Кустарёва. – М. : МАДИ, 2025. – 126 с.

References

1. Balovnev V.I. Optimization and selection of innovative systems and processes of transport and technological machines: textbook. manual. – M. : Tekhpoligraftsentr, 2014. – 392 p.
2. Road-construction machines and complexes : textbook for universities in the specialty «Construction and road machines and equipment» / V.I. Balovnev [et al.]; Under the general editorship of V.I. Balovnev, S.N. Glagolev. – 3rd ed., revised. and additional. – Belgorod : Publishing house of BSTU, 2020. – 523 p.
3. Balovnev V.I. Modeling of processes of interaction with the environment of working bodies of road-construction machines. – 2nd ed. –M.: Mashinostroenie, 1994. – 432 p.
4. Kustarev G.V. Concrete mixers. Device, calculation principles : textbook / G.V. Kustarev, R.G. Danilov, N.M. Andryukhov; Under the general editorship of Professor G.V. Kustaryov. – M. : MADI, 2025. – 126 p.

УДК 691.32:628.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СМЕСЕЙ С МЕТАКАОЛИНОМ И ЗОЛОЙ-УНОСОМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

♦♦♦♦♦

EXPERIMENTAL EVALUATION OF METAKAOLIN-FLY ASH MIXTURES FOR CONSTRUCTION 3D PRINTING

Лизогуб Ирина Владимировна
старший преподаватель
кафедры технологии строительного производства,
Брестский государственный технический университет

Павлова Инесса Павловна
кандидат технических наук,
доцент,
декан архитектурно-строительного факультета,
Брестский государственный технический университет

Лизогуб Александр Александрович
старший преподаватель
кафедры теоретической и прикладной механики,
Брестский государственный технический университет
lutaja-95@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальной оценки влияния соотношения метакаолина и золы-уноса на свойства мелкозернистых цементных смесей для строительной 3D-печати. При постоянном расходе остальных компонентов отношение метакаолина и золы-уноса изменяли от 100/0 до 50/50. Установлено, что состав 50/50 сочетает повышенную подвижность и жизнеспособность с максимальной 28-суточной прочностью: 63,3 МПа при сжатии и 9,7 МПа при растяжении при изгибе.

Ключевые слова: строительная 3D-печать, метакаолин, зола-унос, цементная смесь, подвижность, прочность.

Lizahub Irina Vladimirovna
Senior Lecturer of the Department
of Construction Production Technology,
Brest State Technical University

Pavlova Inessa Pavlovna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Dean of the Faculty of Architecture
and Civil Engineering,
Brest State Technical University

Lizahub Alexander Alexandrovich
Senior Lecturer of the Department
of Theoretical and Applied Mechanics,
Brest State Technical University
lutaja-95@mail.ru

Annotation. The paper presents an experimental evaluation of the effect of the metakaolin-to-fly ash ratio on fine-grained cement mixtures for construction 3D printing. With all other components kept constant, the metakaolin/fly ash ratio was varied from 100/0 to 50/50. The 50/50 mixture combined improved flowability and workability retention with the highest 28-day strength: 63.3 MPa in compression and 9.7 MPa in flexural tension.

Keywords: construction 3D printing, metakaolin, fly ash, cement mixture, flowability, strength.

Благодарность. *Исследование выполнено в рамках задания Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ) на выполнение научно-исследовательской работы (договор № Т26Б-008 от 27.05.2026 г., № гос. регистрации 20262664).*

Введение

Рациональное сочетание активных минеральных компонентов является одним из факторов, определяющих технологические и прочностные свойства мелкозернистых цементных смесей для аддитивного формования. Метакаолин и зола-унос различаются морфологией, дисперсностью и кинетикой пуццолановых реакций. Метакаолин способствует раннему структурообразованию, но может повышать водопотребность и сопротивление течению; зола-унос при благоприятной морфологии частиц способствует сохранению технологической деформируемости смеси [2, 3]. По данным литературы, эффект их совместного применения зависит от характеристик исходных материалов и соотношения компонентов [2, 4, 5], поэтому рациональное отношение МК/ЗУ должно устанавливаться экспериментально для конкретной рецептурной системы. Цель работы – установить влияние соотношения метакаолина и золы-уноса на подвижность, жизнеспособность, прочность и собственные деформации мелкозернистых цементных смесей и определить рациональный состав для дальнейшей проверки применительно к строительной 3D-печати.

Материалы и методы исследования

Смеси изготавливали на основе портландцемента и кварцевого песка. В состав вводили дисперсную фибру и суперпластификатор поликарбоксилатного типа в количестве 1 % от массы вяжущей системы. Суммарный расход минеральной добавки составлял 69,5 кг; при постоян-

ном расходе остальных компонентов варьировали только соотношение метакаолина и золы-уноса. Отношение массы воды к суммарной массе цемента и минеральной добавки составляло около 0,33 (табл. 1).

Таблица 1 – Составы экспериментальных цементных смесей, кг

Компонент	АМЗ-100/0	АМЗ-75/25	АМЗ-50/50
Цемент	800	800	800
Песок	869,5	869,5	869,5
Метакаолин	69,5	52,1	34,8
Зола-унос	–	17,4	34,8
Фибра	5,8	5,8	5,8
Вода	287	287	287
СП (1 %)	8,7	8,7	8,7

Подвижность оценивали по среднему диаметру расплыва на встряхивающем столике, жизнеспособность – по его изменению через 10, 20 и 30 мин после приготовления. Для прочностных испытаний формовали балки 4 × 4 × 16 см; прочность при сжатии и при растяжении при изгибе определяли в возрасте 1, 7 и 28 сут.

Результаты и обсуждение

Начальный средний диаметр расплыва составил 226 мм для АМЗ-100/0, 224 мм для АМЗ-75/25 и 246 мм для АМЗ-50/50. При увеличении доли золы-уноса до 50 % подвижность возросла. Наиболее высокий уровень подвижности во времени также сохранял состав АМЗ-50/50: 271, 270 и 285 мм через 10, 20 и 30 мин соответственно. Для АМЗ-100/0 эти значения составили 231, 234 и 222 мм, для АМЗ-75/25 – 219, 227 и 225 мм. Следовательно, в исследованной серии равное содержание метакаолина и золы-уноса обеспечивало наиболее выраженное сохранение технологической деформируемости. При этом расплыв следует рассматривать как скрининговый показатель, не заменяющий прямых реологических и экструзионных испытаний.

В возрасте 1 сут максимальная прочность при сжатии установлена для АМЗ-100/0 – 34,2 МПа, что подтверждает более интенсивное раннее твердение при повышенном содержании метакаолина. К 7 сут наибольшее значение получено для АМЗ-50/50 – 50,3 МПа, а к 28 сут его прочность при сжатии достигла 63,3 МПа. Аналогичная тенденция в поздние сроки отмечена для прочности при растяжении при изгибе (табл. 2).

Таблица 2 – Прочностные характеристики экспериментальных составов

Состав	Сжатие, МПа			Растяжение при изгибе, МПа		
АМЗ-100/0	1 сут	7 сут	28 сут	1 сут	7 сут	28 сут
АМЗ-75/25	34,2	49,2	58,4	6,6	7,4	9,1
АМЗ-50/50	23,7	38,2	59,9	5,4	7,1	9,6

При оценке собственных деформаций установлено, что основное их развитие происходило на ранних сроках твердения, после чего интенсивность изменения снижалась. Увеличение содержания золы-уноса в комбинированной добавке способствовало снижению усадочных деформаций, тогда как повышенное содержание метакаолина интенсифицировало их развитие в раннем возрасте.

Полученные экспериментальные данные согласуются с предположением о взаимодополняющем действии минеральных компонентов: повышенное содержание метакаолина обеспечивает более интенсивный набор ранней прочности, тогда как увеличение доли золы-уноса способствует сохранению подвижности. В возрасте 28 сут состав с равным содержанием компонентов характеризуется наиболее высокими прочностными показателями. Нелинейный характер влияния смешанной системы отмечен и в литературе [2, 4–5]. Следовательно, результаты исследованной серии подтверждают целесообразность дальнейшей проверки сочетания МК/ЗУ = 50/50 непосредственно в условиях экструзионного формования. Выявленное преимущество относится к принятому комплексу исходных материалов; для оценки пригодности к 3D-печати необходимы испытания экструзии, формоустойчивости, межслойного взаимодействия и реологических характеристик.

Выводы

1. Увеличение доли золы-уноса до 50 % в составе минеральной добавки повысило начальный средний диаметр расплыва до 246 мм; через 10–30 мин для АМЗ-50/50 он находился в диапазоне 270–285 мм.

2. Метакаолин обеспечивал более интенсивный набор ранней прочности: для АМЗ-100/0 в возрасте 1 сут прочность при сжатии составила 34,2 МПа. К 28 сут максимальные значения прочности при сжатии и при растяжении при изгибе получены для АМЗ-50/50 – соответственно 63,3 и 9,7 МПа.

3. Увеличение содержания золы-уноса сопровождалось снижением усадочных деформаций, тогда как повышенное содержание метакаолина интенсифицировало их развитие в раннем возрасте.

4. По совокупности показателей подвижности, жизнеспособности и прочности соотношение метакаолина и золы-уноса 50/50 принято, как рациональное для дальнейшей экспериментальной проверки применительно к строительной 3D-печати.

Литература / **References**

1. Rehman A.U. 3D concrete printing: a systematic review of rheology, mix designs, mechanical, microstructural, and durability characteristics / A.U. Rehman, J.-H. Kim // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 14. – Art. 3800. – DOI: 10.3390/ma14143800
2. Cement with Fly Ash and Metakaolin Blend – Drive towards a More Sustainable Construction / L. Dvorkin [et al.] // Energies. – 2022. – Vol. 15. – Art. 3556. – DOI: 10.3390/en15103556
3. Effect of Metakaolin, Fly Ash and Polypropylene Fibres on Fresh and Rheological Properties of 3D Printing Based Cement Materials / M. Dedenis [et al.] // RILEM Bookseries. – 2020. – Vol. 28. – P. 206–215. – DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_21
4. Modulation of the workability and Ca/Si/Al ratio of cement-metakaolin cementitious material system by using fly ash: Synergistic effect and hydration products / S. Wang [et al.] // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 404. – Art. 133300. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133300
5. Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete / S. Sujjavanich [et al.] // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 155. – P. 830–837. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.072

УДК 691.32, 620.179.12

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ НОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНОВ

♦♦♦♦♦

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF A NEW NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR DETERMINING THE STRENGTH OF CONCRETE

Несветайло Вячеслав Михайлович
кандидат технических наук,
Лауреат государственной премии СССР,
член Московского областного отделения
общественной организации,
Российская инженерная академия
nesvetajlo@gmail.com

Торицын Игорь Валериевич
кандидат технических наук,
ученый секретарь Московского областного отделения
общественной организации,
Российская инженерная академия
igor_toritsyn@mail.ru

Аннотация. Актуальность и предмет исследования. Необходимость проведения исследований по созданию нового неразрушающего метода определения прочности бетонов обусловлена несовершенством действующих методов. Объектом исследований являлся метод определения прочности бетонов, основанный на измерении глубины погружения стального гвоздя по Российскому патенту № RU 2706390. Цель работы. Разработка основных положений стандарта, позволяющего применять предлагаемый метод в качестве неразрушающего метода контроля прочности бетонов. Материалы и методы. В работе использовались такие методы научного исследования как анализ и синтез, в том числе: анализ нормативных документов, научной и технической литературы; разработка программы исследований; анализ полученных результатов и разработка основных положений для создания национального стандарта. Результаты: получены новые экспериментальные данные по применению метода погружения стального гвоздя. Выявлены ограничения для применения исследованного метода и факторы, оказывающие существенное влияние на его достоверность. Разработан проект национального стандарта ГОСТ Р «Бетоны. Определение прочности по глубине погружения дюбель-гвоздя». Выводы. Разработанный метод полностью готов к применению. Метод использует широко используемое стандартное оборудование, что выгодно отличает его от аналогичных методов, применяемых в других странах. Повышение достоверности оценки прочности обеспечивается за счет полного исключения негативного влияния на результат измерений поверхностного слоя железобетонной конструкции.

Ключевые слова: бетон, прочность, неразрушающие методы, дюбель-гвоздь, монтажный пистолет, патроны, глубина погружения.

Nesvetaylo Vyacheslav Mikhailovich
Candidate of Technical Sciences,
Recipient of the USSR State Prize,
Member of the Moscow Regional branch
of the Public Organization,
Russian Engineering Academy
nesvetajlo@gmail.com

Toritsyn Igor Valerievich
Candidate of Technical Sciences,
Scientific Secretary
of the Moscow Regional branch
of the Public Organization,
Russian Engineering Academy
igor_toritsyn@mail.ru

Annotation. Relevance and subject of the study. The need for research into developing a new non-destructive method for determining the strength of concrete stems from the limitations of existing methods. The study focused on a method for determining concrete strength based on measuring the penetration depth of a steel nail, as described in Russian Patent № RU 2706390. Objective of the study. To develop the fundamental provisions for a standard that would allow the proposed method to be used as a non-destructive technique for testing the strength of concrete. Materials and methods. The study employed various scientific research methods, including analysis and synthesis–specifically: the analysis of regulatory documents and scientific and technical literature; the development of a research program; and the analysis of the obtained results to formulate the key provisions for establishing a national standard. Results: New experimental data on the use of the steel-nail penetration method have been obtained. The limitations of this method have been identified, along with the factors that significantly affect the reliability of its results. A draft national standard GOST R has been developed: «Concretes. Determination of strength based on the penetration depth of a dowel nail». Conclusions. The developed method is fully ready for use. The method uses widely available standard equipment, which sets it apart from similar methods used in other countries. The reliability of the strength assessment is improved by completely eliminating the negative impact of the surface layer of the reinforced concrete structure on the measurement results.

Keywords: concrete, strength, non-destructive testing methods, dowel nail, mounting gun, cartridges, penetration depth.

Введение

В настоящее время неразрушающие методы контроля прочности бетона в монолитных и сборных железобетонных конструкциях широко применяются не только в России, но и в других странах. Это связано с тем, что разрушающие методы (изготовление образцов из бетонной смеси и отбор образцов из конструкций) имеют большую трудоемкость и не могут применяться при приемке в эксплуатацию возведенных железобетонных конструкций. Кроме того, современные железобетонные конструкции являются густоармированными и поэтому извлечение из них образцов для испытаний разрушающими методами сопряжено с определенными трудностями. Нужно отметить, что совершенствованию неразрушающих методов традиционно уделяется достаточно большое внимание [1, 2, 3], однако принципиально новых неразрушающих методов, оформленных в виде стандартов в России за последние 50 лет создано не было. В настоящем исследовании была сделана попытка совместить низкую трудоемкость и простоту использования косвенных методов определения прочности с более высокой точностью методов отрыва со скалыванием и метода выбуривания кернов. Попытки создать метод, похожий на предлагаемый, в России предпринимались давно, однако ввести их в практику строительного контроля не удавалось [4, 5]. Следует отметить, что в других странах используются похожие методы измерения прочности бетона [6, 7]. В связи с изложенным, по инициативе авторов в 2018–2021 годах выполнялись исследования по изысканию новых методов контроля прочности бетона. Разработка и совершенствование нового метода базировалась на основе Российского патента [8], оформленного в 2019 году.

Теоретические исследования

Неразрушающие методы определения прочности бетонов по ГОСТ 22690-2015 разделены на прямые и косвенные [9]. При этом следует признать, что обоснованных критериев разделения неразрушающих методов на прямые и косвенные сегодня не существует и никакой работы в этом направлении не проводится. В практике контроля прочности бетона в других странах, понятие прямой неразрушающий метод вообще не применяется и все неразрушающие методы считаются косвенными. При использовании всех косвенных методов, требуется хорошее качество поверхности, поскольку измерения производятся в поверхностном слое бетона толщиной не более 3 мм. Для получения достоверных результатов поверхность проверяемой конструкции не должна иметь даже минимальных дефектов, в том числе после твердения при отрицательной температуре. Должны отсутствовать даже минимальные отслоения в защитном слое бетона, раковины и неровности минимального размера, а также трещины любого характера и ширины раскрытия. Важным условием применения косвенных методов по ГОСТ 22690-2015 является совпадение рецептуры бетона как при построении градуировочных зависимостей, так при контроле прочности в конструкциях, а также совпадение по возрасту и условиям твердения бетона. Поскольку соблюдение всех перечисленных требований в условиях реальной практики, весьма труднодостижимая задача, это приводит в конечном итоге к низкой достоверности результатов контроля. Согласно [9] применение метода отрыва со скалыванием не требует построения градуировочной зависимости. При этом, указанная в ГОСТ 22690-2015 градуировочная зависимость считается универсальной, то есть учитывающей все разнообразие компонентов, применяемых при изготовлении бетонной смеси и условий твердения бетона в конструкциях. Однако при внимательном рассмотрении метода отрыва со скалыванием обнаруживается, что он по своей сути также является косвенным, поскольку основан на измерении прочности бетона на растяжение (косвенный показатель), которая затем пересчитывается в прочность при сжатии (прямой показатель) [10]. Необходимо отметить, что создание метода отрыва со скалыванием проводилось в то время, когда в практике строительства использовались низкомарочные цементы, более крупные чем сегодня заполнители и фактически не применялись химические добавки, которые существенно влияют на прочность бетона. Кроме того, в практике строительства в то время практически не применялись бетоны класса выше В15. Применение метода отрыва со скалыванием, при приемке готовых конструкций в эксплуатацию практически невозможно, поскольку это очень трудоемкий процесс. Высокая трудоемкость метода приводит к тому, что в реальной практике контроля этот метод применяется только для вычисления переходного коэффициента, а сама приемка производится на основе измерений прочности косвенными методами. Поскольку анкерное устройство в методе отрыва со скалыванием имеет сложную конструкцию и эффект проскальзывания, это также приводит к снижению достоверности определения прочности. Применение метода отрыва со скалыванием в несущих конструкциях, особенно в конструкциях транспортных сооружений, приходится ограничивать, поскольку, при этом, создаются искусственные дефекты, понижающие эксплуатационную надежность таких конструкций. Кроме того, применение метода отрыва со скалыванием в густоармированных конструкциях также не может обеспечить достоверность контроля из-за негативного влияния арматуры.

Таким образом можно констатировать, что разработка новых неразрушающих методов контроля прочности бетона продолжает оставаться актуальной задачей.

Экспериментальные исследования

Общие положения. В настоящем исследовании была сделана попытка совместить низкую трудоемкость и простоту использования косвенных методов с более высокой точностью неразрушающих методов. При разработке нового метода было изначально принято условие по использованию стандартного оборудования, применяемого на строительной площадке для крепления закладных деталей. Исследования по разработке нового метода проводились на конструкциях, изготовленных из тяжелого бетона класса В30, широко используемого при возведении монолитных железобетонных конструкций.

Исследования по выбору применяемого оборудования. Теоретически при применении предлагаемого метода могут быть использованы любые монтажные строительные пистолеты, предназначенные для забивки стальных дюбель-гвоздей в железобетонные конструкции. Принципиально важным требованием к пистолетам для забивки дюбель-гвоздей, в данном случае, является наличие у них специального приспособления для обеспечения перпендикулярности погружения дюбель-гвоздя. Из представленных сегодня на рынке пистолетов, таким приспособлением оснащен только пороховой пистолет марки GFT 5 [11] и поэтому именно он использовался в данном исследовании. На рисунке 1 показан пистолет марки GFT 5. При работе с пистолетом могут применяться дюбель-гвозди различной длины и диаметра, изготавливаемые по ТУ 144-1731-92 [12]. В рамках проведенных работ, были проведены исследования по определению влияния параметров примененных дюбель-гвоздей на получаемые результаты. Оптимальным соотношением диаметра и длины дюбель-гвоздя, согласно нашим исследованиям, следует считать один к десяти.



Рисунок 1 – Установка гвоздей

В качестве источника энергии при погружении дюбель-гвоздей могут использоваться патроны, снаряженные пороховым зарядом [13].

Исследования по созданию градуировочной зависимости. Работа проводилась на вертикальной стене реального строительного объекта. Выбор стены был обусловлен тем обстоятельством, что они позволяют сделать необходимое количество измерений для создания градуировочной зависимости, используя только одну конструкцию. Это обстоятельство важно, поскольку использование нескольких конструкций увеличивает разброс отдельных результатов и снижает достоверность контроля в целом. Измерения глубины погружения дюбель-гвоздей производились следующим образом - после погружения измерялась длина его выступающей части с точностью 0,1 мм и затем, по разности длины дюбель-гвоздя и его выступающей части, вычислялась глубина погружения. Количество измерений погружения дюбель-гвоздей на участке измерений составляло восемь вокруг одного отрыва со скалыванием. Прочность по методу отрыва со скалыванием, при этом, определялось по 2 измерениям, что соответствует требованиям ГОСТ 22690-2015. Среднее значение глубины погружения дюбель-гвоздей определялось по 16 измерениям. При отклонении отдельного результата более чем на ±10%, результат не учитывался. Минимальное количество результатов измерения глубины погружения дюбель-гвоздей для вычисления среднего, при построении градуировочной зависимости было принято равным десяти. В соответствии с ГОСТ 22690-2015, для построения градуировочной зависимости были использованы результаты парных(параллельных) измерений на 12 контрольных

участках. При измерении прочности по методу отрыва со скалыванием применялся прибор ПОС-50МГ4, полученные значения округлялись с точностью до 0,1 МПа. Для погружения дюбель-гвоздей использовался пистолет марки GFT 5 порохового типа. Использовались дюбель-гвозди диаметром 4,5 и длиной 60 мм и патроны мощностью 400 Дж. Построенная градуировочная зависимость проверялась в соответствии с требованием ГОСТ 22690-2015. Были вычислены необходимые параметры по формулам Е.4 и Е.5 Приложения Е ГОСТ 22690-2015. Средние значения прочности и глубины погружения дюбель-гвоздей, в данном случае, составили 36,3 МПа и 41,4 мм. Вычисление коэффициентов а и б производилось по формулам Е.3 и Е.2 Приложения Е ГОСТ 22690-2015. Они составили «минус 1,6» и «плюс 102». Таким образом градуировочную зависимость для тяжелого бетона класса В30 можно описать уравнением:

$$R = 102 – 1{,}59 \times H,$$

где R – прочность на сжатие, МПа и H – глубина погружения дюбель-гвоздя

Для решения вопроса о необходимости корректировки созданной градуировочной зависимости было проверено выполнение условий пункта 6.1.6 ГОСТ 22690-2015. Проверка показала, что эти условия выполняются и созданная зависимость может использоваться при контроле прочности в конструкциях. Необходимо отметить, что созданная градуировочная зависимость может применяться только для бетона класса В 30 в диапазоне значений прочности от 30 до 40 МПа. Для всех других видов и классов бетона необходимо создавать свои градуировочные зависимости. При этом принцип и правила их построений не изменяются.

Обсуждение результатов

На основе проведенных исследований был разработан и введен в действие новый национальный стандарт ГОСТ Р 71566-2024. Бетоны. Определение прочности по глубине погружения дюбель-гвоздя [14].

Результаты работы показали, что примененный в работе пистолет не в полной мере обеспечивает перпендикулярность погружения дюбель-гвоздей. Обнаружить на рынке пистолеты, полностью удовлетворяющие этому требованию также, не удалось. По этой причине требуется разработка более совершенного приспособления для перпендикулярного погружения дюбель-гвоздя.

Оценка влияния крупного заполнителя на глубину погружения дюбель-гвоздя показала, что это влияние возникает только при применении гранитного щебня. При этом растворная часть и известняковый щебень на глубину погружения дюбель-гвоздя существенного влияния не оказывают. По результатам проведенных исследований гранитный щебень занижает результат определения прочности не более чем на 8 %. По этой причине можно считать, что предлагаемая отбраковка глубины погружения в пределах ±10 % может считаться гарантией того, что учет дополнительного коэффициента не потребуется.

Для повышения точности и достоверности нового метода, при построении градуировочной зависимости, в качестве опорного метода, вместо отрыва со скалыванием, желательно использовать выбуривание кернов из конструкции. Мы полагаем, что в этом случае новый метод позволит, как минимум, достигнуть точности метода отрыва со скалыванием.

Разработанный метод, предлагается считать косвенным методом неразрушающего контроля прочности, поскольку в научной и нормативной литературе не обнаружены критерии, по которым неразрушающие методы контроля могут быть разделены на прямые и косвенные.

По результатам проведенных исследований можно констатировать, что предлагаемый метод имеет преимущество перед методом отрыва со скалыванием в случае контроля густоармированных конструкций, особенно таких как колонны и балки. Низкая трудоемкость разработанного метода позволяет осуществлять массовую приемку в эксплуатацию железобетонных конструкций.

Для применения нового метода может быть использовано существующее оборудование, применяемое на стройках для крепления стальных закладных деталей к бетону.

Выводы

1. Разработанный метод механического неразрушающего контроля должен использоваться в соответствии с требованиями ГОСТ Р 71566-2024. Бетоны. Определение прочности по глубине погружения дюбель-гвоздя. Область применения метода может быть расширена. В частности, метод может применяться для создания детальной карты распределения прочности бетона в плоскостных конструкциях, особенно после их твердения при низких и отрицательных температурах наружного воздуха.

2. Трудоемкость предлагаемого метода сопоставима с косвенными методами по ГОСТ 22690-2015 и в 10…20 раз ниже метода отрыва со скалыванием. Стоимость оборудования и расходных материалов ниже, чем у остальных методов неразрушающего контроля в 3…5 раз.

3. Создание специальных приборов и дополнительных приспособлений при применении разработанного метода не требуется.

4. Авторы готовы к сотрудничеству по адаптации применения метода для конкретных составов бетона и его проектной прочности, в том числе для разных видов бетона (легкий, напрягающий, мелкозернистый, газобетон и т.п.)

Литература

1. Руководство по определению и оценке прочности бетона в конструкциях зданий и сооружений // НИИСК. – М., 1977.
2. Марков А.И. Методика выполнения измерений при натурных испытаниях методом вырыва анкера / А.И. Марков, Л.С. Павлов, В.А. Клевцов // Методика испытаний. – М., 2003.
3. Лужин О.В. Неразрушающие методы испытания бетона : монография / О.В. Лужин, В.А. Волохов, Г.Б. Шмаков. – М. : Стройиздат, 1985.
4. Скрамтаев Б.Г. Усовершенствование метода испытания прочности бетона в сооружениях стрельбой из нагана / Строительная промышленность. – 1941. – № 3.
5. Росляков П.С. Определение прочности бетона строительно-монтажным пистолетом СМП-1. – М. : Госстройиздат, 1962.
6. ASTM C 803-02: Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete.
7. BS 1881-207 Testing Concrete – Recommendations for the assessments of concrete strength by near-to-surface tests.
8. Торицын И.В. Способ определения прочности по глубине погружения дюбеля-гвоздя в тестируемый бетон и дюбель-гвоздь. Патент на изобретение. Номер патента: RU 2706390 C1 / И.В. Торицын, В.М. Несветайло.
9. ГОСТ 22690-2015.Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. -2016-01-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 11 с.
10. ГОСТ 22690-88. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. 1988-01-01. – М. : Стандартинформ, 1989. – 13 с.
11. Пистолеты монтажные поршневые GFT5. / ТУ 7181-001-90573248-2012. – М., 2012.
12. Дюбели-гвозди с насаженными шайбами с цинковым покрытием. Технические условия / ТУ 14-4-1731-92. – М., 1992.
13. ГОСТ Р 50530-2015. Патроны к гражданскому и служебному огнестрельному оружию, устройствам производственного и специального назначения. Требования безопасности и методы испытаний на безопасность. -2016-01-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 15 с.
14. ГОСТ Р 71566-2024. Бетоны. Определение прочности по глубине погружения дюбель-гвоздя. 2024-08-27. – М. : Российский институт стандартизации, 2024. – 10 с.

References

1. Guidelines for determining and evaluating the strength of concrete in structures of buildings and structures // NIISK. – M., 1977.
2. Markov A.I. Method of performing measurements during field tests by the method of anchor breakage / A.I. Markov, L.S. Pavlov, V.A. Klevtsov // Test method. – M., 2003.
3. Luzhin O.V. Non-destructive testing methods of concrete : monograph / O.V. Luzhin, V.A. Volokhov, G.B. Shmakov. – M. : Stroyizdat, 1985.
4. Skramtaev B.G. Improvement of the method for testing the strength of concrete in structures by firing a nagant / Construction Industry. – 1941. – № 3.
5. Roslyakov P.S. Determination of concrete strength using the SMP-1 construction and installation pistol. – M. : Gosstroyizdat, 1962.
6. ASTM C 803-02: Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete.
7. BS 1881-207 Testing Concrete – Recommendations for the assessments of concrete strength by near-to-surface tests.
8. Toritsyn I.V. Method for determining the strength based on the depth of penetration of a dowel-nail into the concrete under test and the dowel-nail. Patent for an invention. Patent number: RU 2706390 C1 / I.V. Toritsyn, V.M. Nesvetailo.
9. GOST 22690-2015.Concretes. Determination of strength using mechanical methods of non-destructive testing. 2016-01-01. – M. : Standartinform, 2016. – 11 p.
10. GOST 22690-88. Concretes. Determination of strength by mechanical methods of non-destructive testing. 1988-01-01. – M. : Standartinform, 1989. – 13 p.
11. GFT5 piston mounting guns. / TU 7181-001-90573248-2012. – M., 2012.
12. Dowel nails with fitted washers and zinc coating. Technical specifications / TU 14-4-1731-92. – M., 1992.
13. GOST R 50530-2015. Cartridges for civilian and service firearms, industrial and special-purpose devices. Safety requirements and safety test methods. 2016-01-01. – M. : Standartinform, 2016. – 15 p.
14. GOST R 71566-2024. Concretes. Determination of strength based on the penetration depth of a dowel-nail. 2024-08-27. – M. : Russian Standardization Institute, 2024. – 10 p.

УДК 711.1

ВЛИЯНИЕ ПЛАНИРОВОЧНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РУСЛА РЕКИ КАРАСУН В ПРОЦЕССЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ГОРОДА КРАСНОДАРА НА КЛИМАТОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

♦♦♦♦♦

THE IMPACT OF THE PLANNING TRANSFORMATION OF THE KARASUN RIVER CHANNEL ON THE CLIMATIC AND ECOLOGICAL INDICATORS OF THE ENVIRONMENT DURING THE URBAN DEVELOPMENT OF KRASNODAR

Петухова Алина Александровна
магистр,
Кубанский государственный технологический университет
ozerenko777@gmail.com

Дубиненко Никита Александрович
лаборант кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
nikita-dubinenko@yandex.com

Сокольская Оксана Николаевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
ons33@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается трансформация водной системы реки Карасун в процессе градостроительного развития города Краснодара с опорой на генеральные планы различных периодов. Выделены основные градостроительные этапы, повлекшие изменения гидрографической структуры территории, связанные с инженерным освоением поймы, строительством Краснодарской ТЭЦ, массовой интенсивной жилой застройкой и развитием транспортной инфраструктуры. Особое внимание уделено планировочному преобразованию городской среды, рукотворному превращению единого русла реки в систему изолированных озер, сокращению площади открытых водных пространств, а также влиянию данных изменений на климатоэкологические показатели окружающей городской среды современного Краснодара. Проведено исследование по влиянию преобразования реки Карасун на формирование природно-экологического каркаса города, а также на изменение микроклиматических показателей. Обосновывается, что утрата непрерывного водно-зеленого коридора привела к нарушению аэрационного режима среди жилой застройки, а также снижению уровня естественного проветривания городской среды и ухудшению микроклиматических и экологических показателей отдельных районов Краснодара. На основе градостроительного анализа сформулированы выводы о необходимости учета благоприятных микроклиматических факторов водных пространств при разработке проектов комплексного развития территорий, а также развития ветрового режима среди жилой застройки крупного города в условиях южных климатических условий.

Petukhova Alina Alexandrovna
Master's Student,
Kuban State Technological University
ozerenko777@gmail.com

Dubinenko Nikita Aleksandrovich
Laboratory Assistant at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
nikita-dubinenko@yandex.com

Sokolskaya Oksana Nikolaevna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
ons33@mail.ru

Annotation. The article examines the transformation of the Karasun River's water system in the process of urban development of the city of Krasnodar, based on master plans from various periods. The main urban development stages that led to changes in the hydrographic structure of the territory are identified; these are related to the engineering development of the floodplain, the construction of the Krasnodar Thermal Power Plant, large scale intensive residential development, and the development of transport infrastructure. Special attention is paid to the planning transformation of the urban environment, the man-made transformation of the single riverbed into a system of isolated lakes, the reduction in the area of open water spaces, and the impact of these changes on the climatic and ecological indicators of the surrounding urban environment in modern Krasnodar. A study was conducted on the impact of the transformation of the Karasun River on the formation of the city's natural and ecological framework, as well as on changes in microclimatic indicators. It is substantiated that the loss of a continuous water green corridor led to a disruption of the aeration regime among residential development, as well as a decrease in the level of natural ventilation of the urban environment and a deterioration in the microclimatic and ecological indicators of certain districts of Krasnodar. Based on urban planning analysis, conclusions were formulated regarding the need to take into account the favorable microclimatic factors of water areas when developing projects for the integrated development of territories, as well as the development of the wind regime among residential development in a large city under southern climatic conditions.

Ключевые слова: градостроительство, бризовая циркуляция, аэрационный потенциал городской среды, природный каркас, микроклимат города, адаптация городов.

Keywords: urban planning, breeze circulation, aeration potential of the urban environment, natural framework, city microclimate, adaptation of cities.

Введение. В современных условиях изменения климата, роста плотности городской застройки и повышения требований к качеству городской среды особую актуальность приобретает изучение роли природных элементов в формировании экологической устойчивости городов. Одним из значимых элементов природно-экологического каркаса является водно-зеленая инфраструктура, выступающая мощным инструментом повышения устойчивости городов к климатическим и урбанизационным вызовам. Её системное развитие – не просто благоустройство, а стратегический шаг к созданию здоровой, комфортной и безопасной среды для жизни населения [1].

Все эти тенденции также актуальны для Краснодара, являющегося одним из наиболее динамично развивающихся городов юга России, где процессы интенсивной урбанизации на протяжении XX–XXI веков сопровождались существенной трансформацией природного ландшафта. Одним из наиболее значимых изменений стало преобразование исторической водной системы Карасун из единой реки с развитой поймой в разрозненную сеть водоемов [4]. Одновременно произошло сокращение площади открытых водных пространств и разрыв единого водно-зеленого коридора, что существенно изменило микроклиматические показатели в структуре застройки города.

Несмотря на наличие исследований, посвященных формированию и развитию Краснодара, в том числе истории Карасунких озер, вопросы гидрологии, благоустройства городских водных объектов, экологических аспектов градостроительства, влияния трансформации водной системы реки Карасун на микроклиматические показатели городской среды остаются недостаточно изученным. [5] Между тем водные объекты играют важную роль в формировании локальной циркуляции воздуха, обеспечивая проникновение бризовых потоков, снижение перегрева городской территории и улучшение условий естественного проветривания [6]. Утрата непрерывности водных пространств способна оказывать существенное влияние на микроклиматические характеристики городской среды, что требует комплексной оценки с позиций современного градостроительства.

Научная новизна исследования заключается в комплексном рассмотрении эволюции водной системы реки Карасун через призму генеральных планов Краснодара различных исторических периодов с оценкой влияния изменений гидрографической структуры на аэрационный потенциал городской территории. В отличие от существующих исследований, акцент сделан не только на историко-градостроительный анализ преобразования водной системы, но и на выявлении взаимосвязи между трансформацией гидрографической сети и изменением природно-климатических факторов городской среды.

Цель исследования – выявить закономерности трансформации водной системы реки Карасун в процессе реализации генеральных планов Краснодара и оценить влияние изменения гидрографической структуры на микроклимат городской среды Краснодара. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов при подготовке документов территориального планирования и градостроительного зонирования, проектов комплексного развития территорий, программ восстановления водно-зеленого каркаса города и мероприятий, направленных на повышение экологической устойчивости и формирование микроклиматического комфорта городской среды Краснодара.

Результаты исследования. Градостроительный анализ следует начать с момента основания Краснодара (в тот период Екатеринодара) черноморскими казаками в 1793 году. Территория для строительства нового города была выбрана в весьма уникальном месте с точки зрения природных и ландшафтных характеристик.

К концу 1794 года в месте впадения реки Карасун в реку Кубань была построена Екатеринодарская земляная крепость, к северу от нее, на правом берегу реки Карасун, появились первые жилые кварталы. Таким образом, город изначально был с трёх сторон окружён водными объектами, а также соседствовал с густыми дубовыми лесами, произраставшими по берегам реки Кубань [7].

В первые годы существования города река Карасун представляла собой практически непрерывную водную систему, соединенную с сетью пойменных водоемов. Берега были преимущественно свободны от капитальной застройки, наблюдались минимальные изменения водно-зеленого каркаса и сохранялась целостность воздушных коридоров, которые играли важную роль в формировании микроклимата южного города, подверженного термическому нагреву. Особенную полноводность данная водная система приобретала в период паводковых вод на реке Кубань, когда Карасун фактически превращался в один из ее рукавов.

В период первой половины XIX века, до окончания Кавказской войны, наблюдалось развитие городской территории без масштабных изменений в гидрографической сети Карасуна (рис. 1). Открытая пойма реки обеспечивала свободное проникновение воздушных масс вглубь

территории Екатеринодара, что также облегчалось малой этажностью и низкой плотностью застройки, которая представляла собой не столько классический городской морфотип, сколько усадебную застройку с обширными садовыми участками.

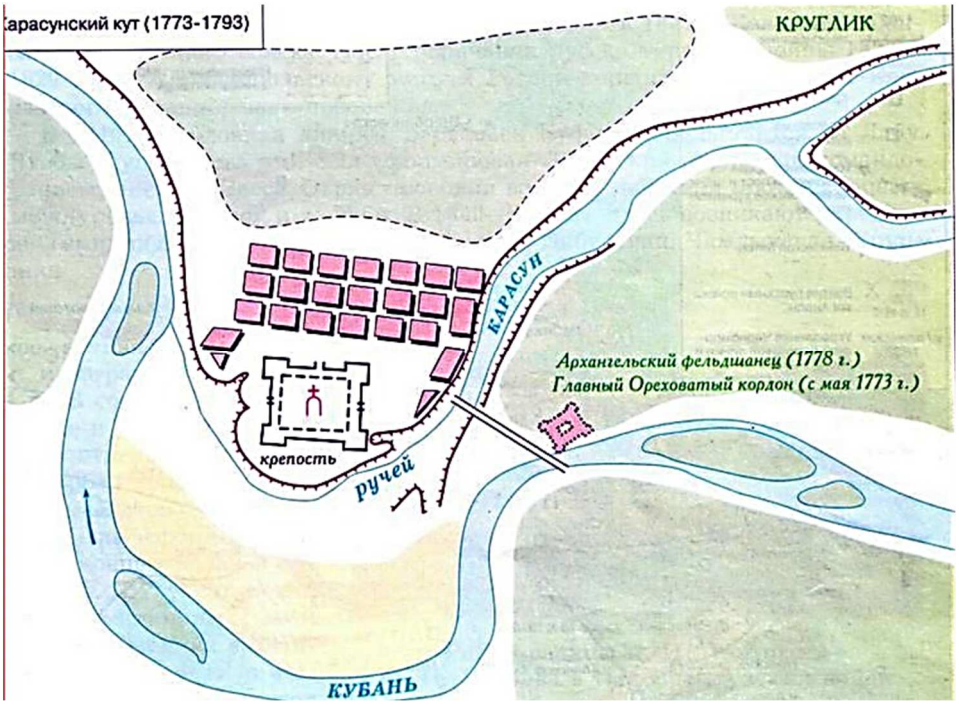


Рисунок 1 – Схема развития города Екатеринодара с учетом реки Карасун, 1793 г.
***Источник**:* https://pervomai-biblio.ru/2023/04/27/история-кубанского-казачества/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera

Долгое время реки и прибрежные леса формировали биоклиматическое разнообразие в городе Екатеринодаре. С принятием гражданского статуса в 1867 году начался активный рост Екатеринодара. В 1870-е году сильно изменился облик реки Карасун, которая ранее влияла на формирование улично-дорожной сети и корректировала направление развития города. Казаки стали строить через Карасун дамбы, а потом и вовсе осушили часть реки, засыпали ее (при этом дамбы утратили свое значение, став обычными городскими улицами) и стали возводить там жилье [5]. На разрушение единого русла реки Карасун повлияло строительство ветки Владикавказской железной дороги до города Екатеринодара в 1887 году.

Река Карасун постепенно превращалась в сеть разрозненных озер и теряла старые функции: формирование аэрационного коридора в непосредственной близости от жилой застройки и отвод ливневых вод в период дождей. Для вывода дождевой воды из восточной части города был построен Карасунский водоотводный канал, частично повторявший траекторию русла реки: он проходил от Карасунских озер (современные Покровские озера) до реки Кубань, у стен крепости. Городская застройки располагалась в некотором отдалении от канала, вследствие чего ветровой коридор от Карасунских озер первое время сохранялся.

Менялся облик территорий у берега реки Кубань: дубовые леса, произраставшие там, постепенно вырубались, древесина использовалась горожанами для хозяйственно-бытовых нужд. Также к концу XIX века рядом с Екатеринодаром, за полотном Владикавказской железной дороги, на месте одного из дубовых лесов окончательно сформировался новый городской район, названный Дубинкой. Проблема необдуманной хозяйственной деятельности в вопросе природопользования и сохранения водных объектов и лесных массивов привела к практически полному уничтожению дубовых рощ в окрестностях Екатеринодара.

Строительство маслобойного завода братьев Аведовых в восточной части города и создание новой железнодорожной линии Екатеринодар-Тимашевская еще больше усугубили положение реки Карасун. С течением времени Карасунские (Покровские) озера ощутимо отделились от других остатков речного русла, стали звучать планы по их уничтожению путем засыпки и возведению новых жилых кварталов как продолжения района Покровки (эти планы были визуализированы на плане города Екатеринодара 1912 года).

В советский период, уже в городе Краснодаре, генеральный план 1923–1924 годов, подготовленный научно-технической комиссией областного коммунального управления, в отношении реки Карасун предусматривал следующее: на месте района Дубинка организовать фабрично-промышленный район без жилых кварталов, который должен быть отделен от остальной застройки рекой Карасун (предусматривалось строительство мостов и дамб). Таким образом,

постепенно велась политика целенаправленного разрушения единой структуры реки Карасун. В особенности это можно проследить на примере русла реки в районе современной улицы им. Вишняковой: рекреационный и микроклиматический потенциал водного объекта в данном случае не использовался, по берегам велась постепенная застройка, не учитывающая фактор водоема, набережные и открытые пространства не организовывались. Впоследствии такая политика привела к исчезновению реки Карасун в данном месте по причине его осушения.

К началу 30-х годов XX века был засыпан Карасунский канал, на его месте была создана обычная городская улица (сейчас она носит имя полководца А.В. Суворова), с течением времени по ее красным линиям стали появляться многоквартирные жилые здания.

В предвоенный период новый генеральный план города Краснодара 1939–1940 годов подчеркивал необходимость дальнейшего расширения зеленых зон. Согласно генеральному плану, планировалось около Карасунских озер устроить зону центрального городского гидропарка. Таким образом, впервые в градостроительном документе учитывался рекреационный потенциал данного водного объекта и предлагались меры по его развитию для нужд горожан.

Первый генеральный план г. Краснодара послевоенного периода (1945–1946 годов) в значительной мере был сфокусирован на восстановлении города в целом и предприятий промышленности в частности. Объектам озеленения и рекреационным зонам отводилось меньшая роль. В 1954 году в восточной части города была запущена первая очередь Краснодарской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), которая полностью разделила Карасунские озера (появились Краснодарская и Пашковская их части) и отрезала их от связи с руслом Старой Кубани.

В генеральном плане 1955 года больше внимания уделялось гражданскому строительству, благоустройству, озеленению городских территорий. Вторая половина 1950-х годов считается периодом начала эпохи массового жилищного строительства в СССР. Все эти тенденции были характерны и для города Краснодара, на востоке которого стали возводиться первые пятиэтажные типовые дома в рамках строительного эксперимента. Вскоре строительство стало масштабным и массовым, был построен новый микрорайон типовых пятиэтажных домов – краснодарские Черемушки. При этом отмечается, что городская инфраструктура не поспевала за ударными темпами строительства жилья, целые жилые кварталы застраивались без четкого плана либо с нарушением положений генерального плана города.

Такое положение вещей в значительной степени отразилось на Карасунских озёрах, которые оказались фактически окружены жилой застройкой, а также строениями хозяйственно-бытового назначения и объектами городской инфраструктуры. Часть озер от улицы им. Вишняковой до улицы им. Димитрова была полностью засыпана. Все эти мероприятия негативно сказались на рекреационном потенциале водных объектов, которые оказались «на заднем дворе» нового жилого массива. Также наблюдается засыпка отдельных участков поймы, из-за прокладки новых дорог и инженерных коммуникаций. Заметно сокращаются прибрежные зеленые территории [8].

В период второй половины 1950-х – первой половины 1960-х годов в Краснодаре активно строятся крупные спортивные объекты, один из которых – стадион «Кубань». Создание данных объектов сопровождалось активным озеленением близлежащих территорий, что впоследствии повлияло на становление зеленого каркаса центральной части города. В особенности это коснулось Карасунских (Покровских) озёр, которые после открытия стадиона «Кубань» и создания парковой зоны рядом с ним, были отделены от прочей городской застройки (в том числе от железной дороги и предприятий промышленности), что позволило в данном месте развиться уникальной экосистеме, защищенной от антропогенного воздействия.

В 1972 году был утвержден очередной генеральный план Краснодара. Среди положений данного генерального плана стоит отметить проект расширения застройки в юго-западном направлении с выходом в перспективе на левый берег реки Кубани и юго-восточном направлении – в сторону строившегося Краснодарского водохранилища (предполагалось использование богатого рекреационного потенциала водных объектов в черте г. Краснодара). На территории окраин г. Краснодара проектировались новые крупные жилые массивы (микрорайоны Комсомольский и Западный). Застройка Комсомольского микрорайона на востоке города учитывала рекреационный потенциал пашковской части Карасунских озер, которые к тому моменту были разделены множеством дамб и насыпей (рис. 2).

В период 1980-х годов Карасун окончательно превращается в систему разобщенных озер, существенно возрастает аэродинамическое сопротивление городской среды. Ослабевает роль водной системы, как природного вентиляционного канала, ухудшается микроклимат прилегающих районов, возникает понятие острова тепла (что особенно усугубляется существованием промышленных предприятий с вредоносными выбросами непосредственно в центральной части города). Скопление горячего воздуха в отдельных районах происходит из-за массовой жилой застройки.

Период с 2004 по 2020 годы водная система сохраняется в виде отдельных озер без восстановления гидрологической целостности (рис. 3). Еще большее уплотнение городской застройки, освоение новых микрорайонов, большой приток людей и увеличение количества ма-

шин влечет за собой увеличение искусственных покрытий, масштабное высотное строительство, ухудшение условий естественной аэрации и усиление эффекта городского острова тепла.

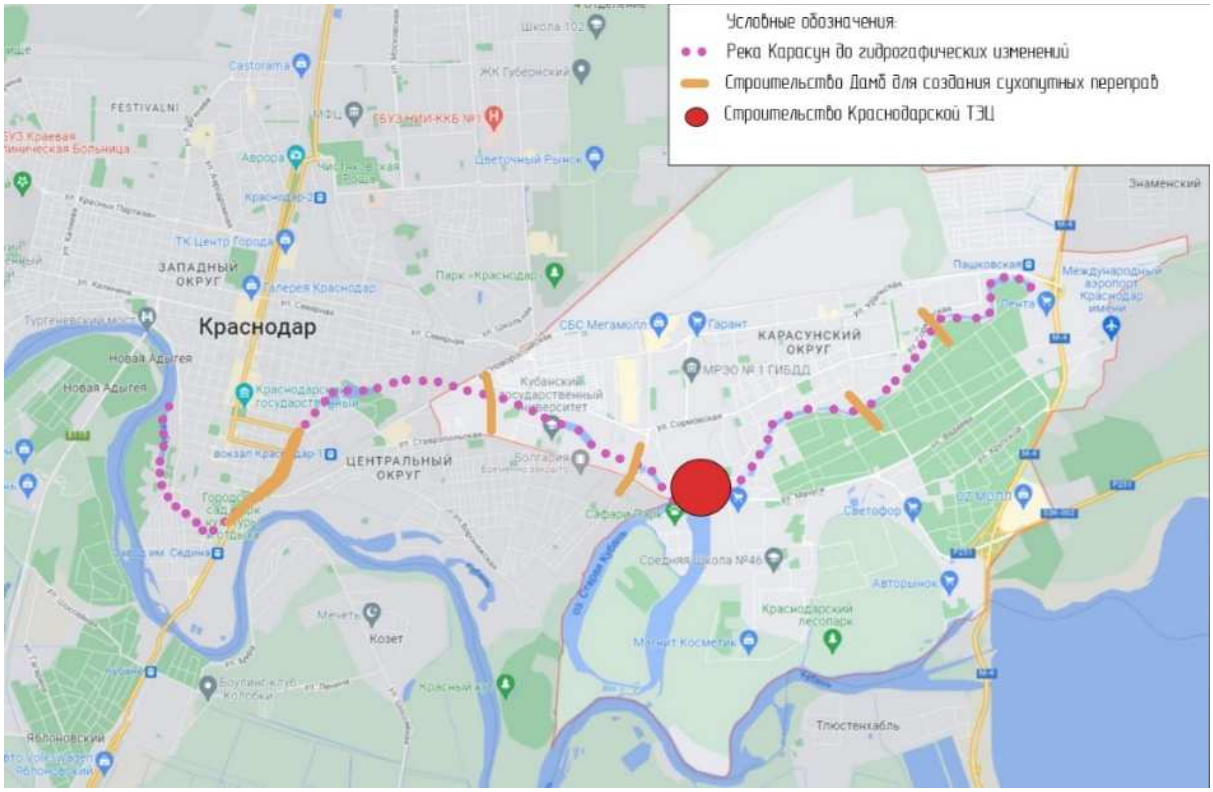


Рисунок 2 – Схема изменений реки Карасун с течением времени и развитием города

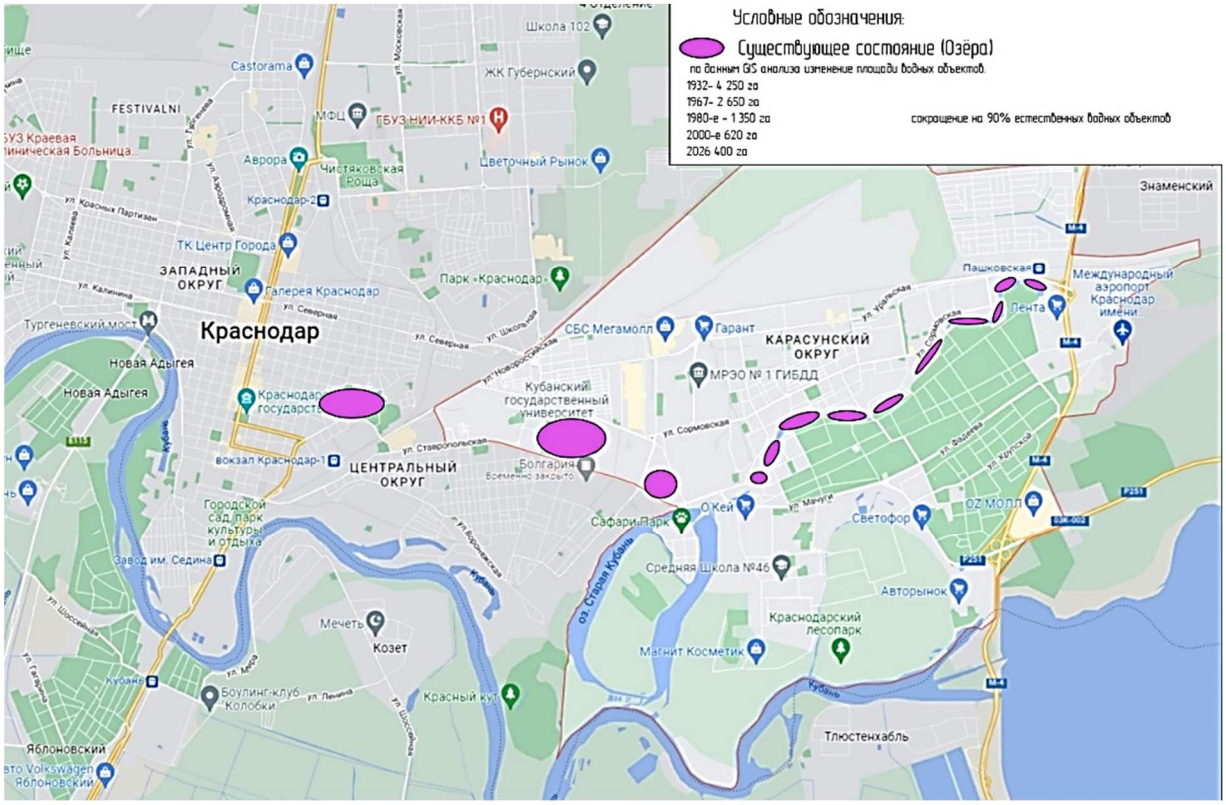


Рисунок 3 – Современное состояние системы изолированных озер

Современный генеральный план 2024–2044 годов предусматривает обширное благоустройство прибрежных территорий и развитие рекреационных пространств вдоль Карасунских озер. Планируются мероприятия по развитию зеленого каркаса, созданию общественных пространств и экологической реабилитации отдельных участков водной системы. При этом сохраняется высокая плотность застройки. Концепция водно-зеленой инфраструктуры прослеживается лишь частично. Основной акцент сделан на благоустройстве, тогда как вопросы восстановления микроклиматических показателей, формирования непрерывных воздушных коридоров и повышения аэрационного потенциала отражены недостаточно.

Обсуждение результатов. Водно-зеленый каркас является важнейшим элементом формирования «здорового» города, оказывая существенное влияние на формирование локального микроклимата и естественной аэрации [9]. Исторически, река Карасун выполняла функцию воздушного коридора, способствуя проникновению более прохладных воздушных масс с поймы реки Кубань в восточные и центральные районы Краснодара.

Нарушение непрерывности водно-зеленого каркаса сопровождалось сокращением площади открытых пространств. В результате уменьшилась интенсивность воздухообмена, увеличилась влажность, ухудшились условия рассеивания загрязняющих веществ, снизилось качество воздуха и усилилось накопление тепла в районах с высокой плотностью застройки [11]. Особенно выраженное влияние данные процессы оказывают в периоды летнего перегрева, когда подстилающая поверхность нагревается до +42 °С, фасады и крыши зданий нагреваются до +64 °С [12, 14], в такие периоды естественная вентиляция является одним из основных факторов формирования комфортного микроклимата.

В ходе исторического развития Краснодара гидрографическая структура реки Карасун претерпела существенные изменения под воздействием градостроительной деятельности (рис. 4). В настоящее время водная система реки Карасун функционирует как комплекс изолированных озер. Современные градостроительные документы предусматривают благоустройство прибрежных территорий и развитие рекреационных пространств, однако, вопросы восстановления гидрологической связности, сохранения воздушных коридоров и повышения эффективности естественного проветривания городской среды остаются недостаточно проработанными. В результате градостроительной деятельности микроклимат города кардинально изменился, создав комплекс экологических и климатических проблем в сфере естественного проветривания застройки.

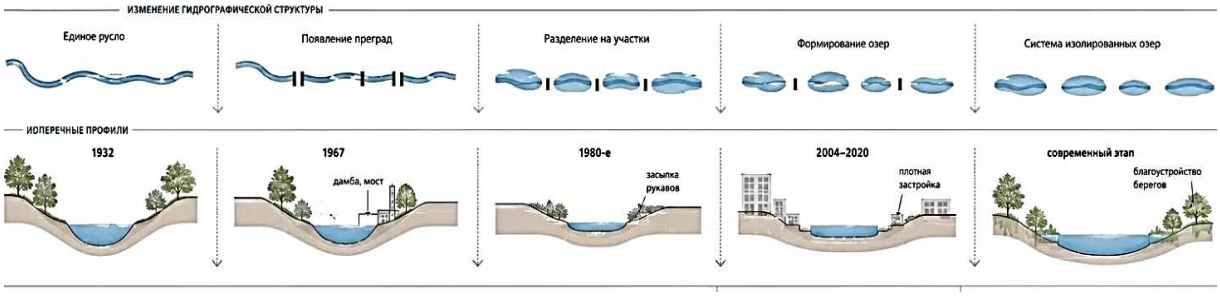


Рисунок 4 – Основные этапы Трансформации русла реки Карасун

Выводы. Таким образом, трансформация гидрографической структуры реки Карасун явилась следствием комплексного инженерного и градостроительного освоения территории. Изменение пространственной организации водной системы сопровождалось утратой ее природно-климатических функций, нарушением целостности водно-зеленого каркаса и снижением аэрационного потенциала городской среды, что требует учета климато-адаптивных принципов при дальнейшем развитии прибрежных территорий Краснодара [8].

Установлено, что по мере реализации градостроительных решений XIX–XXI веков произошел переход от непрерывной речной системы к комплексу изолированных озер, сопровождавшийся изменением гидрографической структуры, сокращением площади открытых водных пространств и нарушением целостности водно-зеленого каркаса. Исследование показало, что инженерное освоение пойменных территорий, строительство транспортной инфраструктуры, развитие энергетического комплекса и интенсивная жилая застройка оказали комплексное воздействие на природную систему реки Карасун и города в целом. Эти процессы сопровождались увеличением аэродинамического сопротивления городской среды, ослаблением бризовой циркуляции и снижением эффективности естественного проветривания, результатом стало появление эффекта «городского острова тепла» отдельных районов Краснодара [11, 12]. При этом следует учитывать, что изменение микроклиматического режима обусловлено совокупностью градостроительных факторов, среди которых трансформация водной системы является одним из ключевых, но не единственным.

В данных условиях необходимо проведение оздоровительных мероприятий для улучшения экологических характеристик и снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет внедрения контроля и регулирования атмосферных загрязнений. Приведены некоторые из подобных мероприятий: снижения пиков загрязнения атмосферного воздуха; исключения поступления низкокачественных мазутов, а также снижение использования мазута и твердого вида топлива в ТЭЦ и котельных; усиление контроля, обеспечения рациональной системы дорожного движения в городах; строительство объездных дорог; усовершенствования автотранспортных средств в целях сокращения объема выбрасываемых ими вредных веществ [11].

При разработке современных градостроительных решений целесообразно учитывать микроклиматический потенциал территории застройки, расположенной вдоль водных объектов как один из факторов формирования комфортной и климатически устойчивой городской среды:

1. В первую очередь необходимо восстановить целостность водно-зеленого каркаса. Создать открытые пространства, минимизировать препятствия для аэрации и проветривания территории города, «умное» озеленение, с учетом потенциала эко-системы. Непрерывный пояс прогулочных маршрутов, велодорожек, мест активного отдыха.

2. В отличие от традиционного подхода, ориентированного преимущественно на благоустройство прибрежных территорий, предложенные рекомендации рассматривают Карасунскую водную систему как элемент климатической планировочной инфраструктуры города. Такой подход предполагает включение оценки аэрационного потенциала в состав обязательных градостроительных исследований наряду с транспортным, инженерным и экологическим анализом [8]. Это позволяет перейти от локального благоустройства к климатически адаптивному проектированию, где водные объекты становятся не только рекреационными зонами, но и важнейшими регуляторами микроклимата и естественной вентиляции городской среды.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета потенциала водных объектов при разработке документов территориального планирования [6]. Сохранение и восстановление непрерывности водно-зеленого каркаса, ограничение размещения высотной застройки в пределах основных воздушных коридоров, а также формирование линейных рекреационных пространств вдоль Карасунских озер способны повысить интенсивность естественного воздухообмена и улучшить микроклиматические характеристики городской среды, в том числе снизить эффект городского «острова тепла».

При разработке генеральных планов, правил землепользования и проектов комплексного развития территорий необходимо учитывать влияние водных объектов на формирование локального микроклимата, снижение эффекта городского острова тепла и обеспечение естественного воздухообмена.

Литература

1. Jagadisan S. Promoting integrated blue–green infrastructure for urban resilience-lessons learned from case studies. Front. Water 6:1474411. – 2024. – DOI: 10.3389/frwa.2024.1474411; Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. – Hoboken: Wiley, 2020.
2. Сокольская О.Н. Основы теории градостроительства и планировка населенных мест Краснодарского края : учеб. пособие / О.Н. Сокольская, В.Т. Иванченко, В.В. Клименко. – Краснодар : Издательство ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2022. – 204 с.
3. Сокольская О.Н. Послевоенное восстановление Краснодара / О.Н. Сокольская, Н.А. Дубиненко // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2024. – № 2(35). – С. 11-15.
4. Решение городской Думы Краснодара от 19 ноября 2020 года № 4 п. 10 «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития муниципального образования город Краснодар до 2030 года». Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL : https://docs.cntd.ru/document/571007846 (дата обращения 29.08.2026).
5. Субботин О.С. Проблемы архитектурно-планировочной организации прибрежной среды г. Краснодара // Жилищное строительство. – 2019. – № 12. – С. 8–13.
6. Identifying urban ventilation corridors through quantitative analysis of ventilation potential and wind characteristics / X. Zhang [et al.] // Building and Environment. – 2022. – Vol. 214.
7. Маркова О.Н. Опыт типологического анализа исторической застройки города Краснодара // Наследие веков. – 2019. – № 1(17). – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-tipologicheskogo-analiza-istoricheskoy-zastroyki-goroda-krasnodara (дата обращения 30.08.2026).
8. Илюхин С.Р. При реке Кубани, в Карасунском куте или ландшафтная экология Екатеринодара в историческом плане. – Краснодар : ООО «Кубаньпечать», – 1998. – 152 с.
9. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review / K. Tzoulas [et al.] // Landscape and Urban Planning. – 2007. – Vol. 81(3). – P. 167–178.
10. Правила землепользования и застройки на территории муниципального образования город Краснодар. – URL : https://krd.ru/administratsiya/administratsii-krasnodara/upravlenie-munit si-

palnogo-kontrolya/mzk/normativnye-dokumenty/postanovlenie-administratsii-mo-gorod-krasnodar-ot-14-04-201/ (дата обращения 09.09.2026).
11. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в городе Краснодаре в 2015 году: Государственный доклад. – Краснодар : Управление Рос-потреб-надзора по Краснодарскому краю, – 2016. – 103 с. – URL : https://23.rospotrebnadzor.ru/content/364 (дата обращения 29.08.2026).
12. СП 131.13330.2025. Строительная Климатология. Дата введения: 09.09.2025. – URL : https://www.kontur-extern.ru/info/normativ/document/9/500138-svod-pravil-stroitelnaya-klimatologiya-snip-23-01-99-sp-131-13330-2025 (дата обращения 10.09.2026).
13. СП 131.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Дата введения: 01.07.2017. – URL : https://base.garant.ru/71692326/?ysclid=mubfig9knq271 339204 (дата обращения 10.09.2026).
14. СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Дата введения: 01.07.2017. – URL : https://docs.cntd.ru/document/1200095525?ysclid=mubfk8nsuv224070302 (дата обращения 10.09.2026).

References

1. Jagadisan S. Promoting integrated blue–green infrastructure for urban resilience-lessons learned from case studies. Front. Water 6:1474411. – 2024. DOI: 10.3389/frwa.2024.1474411Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling. – Hoboken: Wiley, 2020.
2. Sokolskaya O.N. Fundamentals of Urban Planning Theory and the Layout of Human Settlements in the Krasnodar Territory : textbook / O.N. Sokolskaya, V.T. Ivanchenko, V.V. Klimenko. – Krasnodar: Kuban State Technological University (KubSTU) Publishing House, 2022. – 204 p.
3. Sokolskaya O.N. Post war reconstruction of Krasnodar / O.N. Sokolskaya, N.A. Dubinenko // Urban Planning. Infrastructure. Communications. – 2024. – № 2(35). – P. 11–15.
4. Decision of the Krasnodar City Duma dated November 19, 2020, № 4, clause 10 «On the approval of the Strategy for the socio-economic development of the municipal entity of the city of Krasnodar until 2030». Electronic fund of legal and regulatory technical documents. – URL : https://docs.cntd.ru/document/571007846 (date of application 08.29.2026).
5. Subbotin O.S. Problems of architectural and planning organization of the coastal environment of Krasnodar // Housing Construction. – 2019. – № 12. – P. 8–13.
6. Identifying urban ventilation corridors through quantitative analysis of ventilation potential and wind characteristics / X. Zhang [et al.] // Building and Environment. – 2022. – Vol. 214.
7. Markova O.N. An Attempt at Typological Analysis of the Historical Development of the City of Krasnodar // Heritage of Centuries. – 2019. – № 1(17). – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-tipologicheskogo-analiza-istoricheskoy-zastroyki-goroda-krasnodara (date of application 30.08.2026).
8. Ilyukhin S.R. By the Kuban River, in the Karasun Kut, or the Landscape Ecology of Yekaterinodar in Historical Perspective. – Krasnodar : LLC «Kubanpechat», 1998. – 152 p.
9. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review / K. Tzoulas [et al.] // Landscape and Urban Planning. – 2007. – Vol. 81(3). – P. 167–178.
10. Land use and development regulations for the territory of the municipal entity of the city of Krasnodar. – URL : https://krd.ru/administratsiya/administratsii-krasnodara/upravlenie-munit sipalnogo-kontrolya/mzk/normativnye-dokumenty/postanovlenie-administratsii-mo-gorod-krasnodar-ot-14-04-201 (date of application 09.09.2026).
11. On the state of sanitary and epidemiological well being of the population in the city of Krasnodar in 2015: State report. – Krasnodar : Department of Rospotrebnadzor for the Krasnodar Territory, 2016. – 103 p. – URL : https://23.rospotrebnadzor.ru/content/364 (date of application 29.08.2026).
12. SP 131.13330.2025. Construction Climatology. Date of introduction: 09.09.2025. – URL : https://www.kontur-extern.ru/info/normativ/document/9/500138-svod-pravil-stroitelnaya-klimatologiya-snip-23-01-99- sp-131-13330-2025 (date of application 09.10.2026).
13. SP 131.13330.2016 Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements. Date of introduction: 01.07.2017. – URL : https://base.garant.ru/71692326/?ysclid=mubfig9knq271 339204 (date of application 10.09.2026).
14. SP 50.13330.2012 «Thermal protection of buildings». Date of introduction: 01.07.2017. – URL : https://docs.cntd.ru/document/1200095525?ysclid=mubfk8nsuv224070302 (date of application 10.09.2026).

УДК 691.32

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

♦♦♦♦♦

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL BASIS FOR OBTAINING HIGH-QUALITY CONSTRUCTION COMPOSITES BASED ON SECONDARY RAW MATERIALS

Сайдумов Магомед Саламувич
кандидат технических наук,
доцент кафедры
Технология строительного производства»,
заведующий Молодежной лабораторией низкоуглеродных строительных технологий «Эко-Материаловед»,
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова
saidumov_m@mail.ru

Аннотация. В статье представлены теоретические и методологические основы получения высококачественных строительных композитов нового поколения на основе техногенного сырья. Систематизированы ключевые теоретические положения, включающие эволюцию строительных композитов, многоуровневую иерархическую структуру, фундаментальные закономерности межфазного взаимодействия, термодинамические и кинетические основы структурообразования, а также «эффекты нового поколения» – самоорганизацию, самоуплотнение, самовосстановление и адаптивность. Разработана методология, объединяющая компьютерное проектирование, синтез и модифицирование компонентов, технологическое формование, структурный контроль и адаптивное управление на основе цифровых двойников. Экспериментально подтверждена эффективность предложенных подходов на бетонах классов В35–В100, показано снижение углеродного следа на 40–80 % по сравнению с традиционными бетонами. Работа выполнена в рамках Госзадания FZNU-2024-0003.

Ключевые слова: строительные композиты, высококачественные бетоны, техногенное сырьё, теоретические основы, методология проектирования, многоуровневая структура, межфазное взаимодействие, эффекты нового поколения, цифровое моделирование.

Saidumov Magomed Salamuvich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Construction Production Technology,
Head of the Youth Laboratory of Low-Carbon Construction Technologies «Eco-Materialoved»
Grozny State Petroleum Technological University named After Academician M.D. Millionshchikov
saidumov_m@mail.ru

Annotation. This article presents the theoretical and methodological foundations for producing high-quality new-generation building composites using technogenic raw materials. Key theoretical principles are systematized, including the evolution of building composites, multilevel hierarchical structure, fundamental laws of interphase interaction, thermodynamic and kinetic principles of structure formation, as well as «new-generation effects» – self-organization, self-compactification, self-healing, and adaptability. A methodology has been developed that combines computer-aided design, synthesis and modification of components, process molding, structural control, and adaptive management based on digital twins. The effectiveness of the proposed approaches has been experimentally confirmed on B35–B100 grade concrete, demonstrating a 40–80 % reduction in carbon footprint compared to traditional concrete. This work was completed within the framework of State Contract FZNU-2024-0003.

Keywords: building composites, high-quality concrete, man-made raw materials, theoretical foundations, design methodology, multi-level structure, interphase interaction, next-generation effects, digital modeling.

Современное строительное материаловедение находится на этапе смены парадигмы: от эмпирического подбора составов бетонных композитов к их направленному проектированию на основе фундаментальных теоретических знаний и цифровых методов. Этот переход обусловлен несколькими ключевыми факторами: истощением легкодоступных месторождений высококачественного природного сырья, необходимостью утилизации многотоннажных отходов строительства и сноса, ужесточением экологических требований и переходом к низкоуглеродным технологиям [1, 2]. В этих условиях создание высококачественных строительных композитов нового поколения требует разработки целостной теоретической и методологической платформы, интегрирующей достижения физико-химической механики, материаловедения техногенного сырья, цифрового моделирования и адаптивных технологий.

Цель настоящей работы – обобщение теоретических и методологических основ получения высококачественных строительных композитов нового поколения, разработанных в рамках диссертационного исследования автора публикации, и представление их в виде единой систе-

мы, обеспечивающей переход от разрозненных решений частных задач к комплексному проектированию материалов с заданными свойствами, долговечностью и минимальным углеродным следом.

Теоретические основы. Анализ эволюции строительных композитов позволяет выделить четыре поколения материалов, различающихся целевыми установками, технологическими решениями и методологией проектирования. Первое поколение (1G) – традиционные бетоны на портландцементе (конец XIX в. – 1940-е гг.) – характеризуется прочностью до 30–40 МПа и эмпирическим подбором составов. Второе поколение (2G) – высокопрочные и модифицированные бетоны (1950–1990-е гг.) – связано с появлением химических добавок и достижением прочности 80–120 МПа. Третье поколение (3G) – высококачественные бетоны (2000–2020-е гг.) – отличается переходом к комплексу свойств: удобоукладываемости, сохраняемости, долговечности, трещиностойкости, с прочностью до 150–200 МПа. Четвёртое поколение (4G) – полифункциональные, «интеллектуальные» и «зелёные» композиты (2020 – настоящее время) – характеризуется сменой целевых установок: от «материал для конструкции» к «материал для системы «человек – среда обитания»», обязательным использованием техногенного сырья, низким углеродным следом и способностью к самодиагностике и самовосстановлению [1, 3].

Хронологическая шкала, отражающая четыре поколения строительных композитов, представлена на рисунке 1. Ключевыми драйверами смены поколений являются архитектурно-строительные вызовы, сырьевые и экологические ограничения, технологические прорывы в смежных областях, а также трансформация нормативной базы, закреплённая в стандарте ISO 19338:2025, который закрепляет переход к подходу, основанному на результативности и эффективности (performance-based) [4].

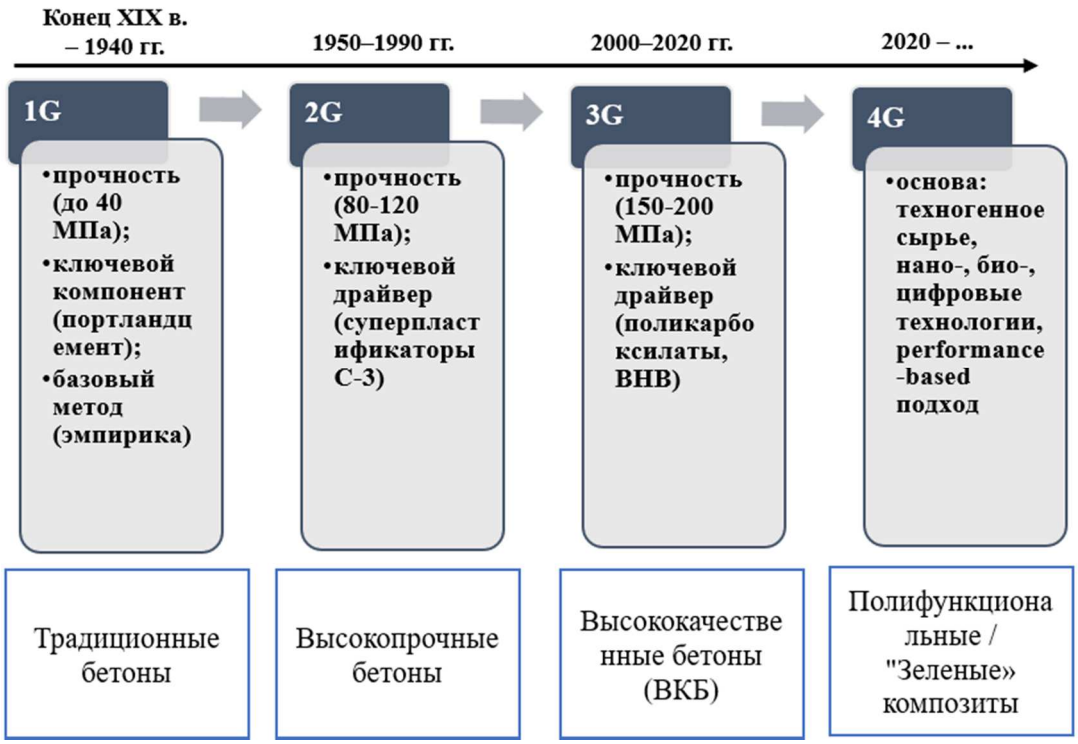


Рисунок 1 – Хронологическая шкала, отражающая 4 поколения «G» строительных композитов

Современные бетонные композиты представляют собой сложные гетерогенные системы, свойства которых определяются взаимодействием процессов на нескольких масштабных уровнях. В работе обоснована пятиуровневая иерархическая модель структуры бетонного композита, включающая нано-, микро-, мезо-, макро- и впервые вводимый эко-уровень, отражающий углеродный баланс и потенциал рециклинга материала (табл. 1).

Наноуровень (1–100 нм) определяет атомно-молекулярную структуру гелевых фаз C–S–H, C–A–S–H, N–A–S–H. Микроуровень (0,1–100 мкм) охватывает поровую структуру и межфазную переходную зону (ITZ). Мезоуровень (0,1–5 мм) определяется распределением заполнителей и дефектов. Макроуровень (> 5 мм) проявляется в интегральных свойствах композита. Эко-уровень (жизненный цикл) учитывает углеродный след, потенциал карбонизации и рециклинга [5, 6]. Многоуровневая структура бетонных композитов схематически представлена на рисунке 2.

Таблица 1 – Масштабные уровни структуры бетонных композитов и определяющие параметры

Масштабный уровень	Характерный диапазон	Основные структурные элементы	Определяющие параметры	Влияние на свойства композита
Наноуровень	1–100 нм	C–S–H, C–A–S–H, N–A–S–H гели	Ca/Si-отношение; степень полимеризации; удельная поверхность	Плотность матрицы, химическая стойкость, начальная прочность
Микроуровень	0,1–100 мкм	Поровая структура; гидратные фазы; контактная зона (ITZ)	Пористость; степень гидратации; толщина ITZ	Проницаемость, усадка, долговечность, сцепление
Мезоуровень	0,1–5 мм	Зёрна заполнителя; вторичные частицы; воздушные поры	Зерновой состав; плотность упаковки; доля вторичного заполнителя	Удобоукладываемость, водопотребность, трещино-стойкость
Макроуровень	> 5 мм	Бетон как конструкционный композит	Прочность, модуль упругости, деформативность	Эксплуата-ционные характеристики, несущая способность
Экоуровень	Жизненный цикл	Сырьевая база; углеродный баланс; рециклинг	CO_2-экв./м³; доля техногенного сырья; срок службы	Экологическая эффективность, углеродный след

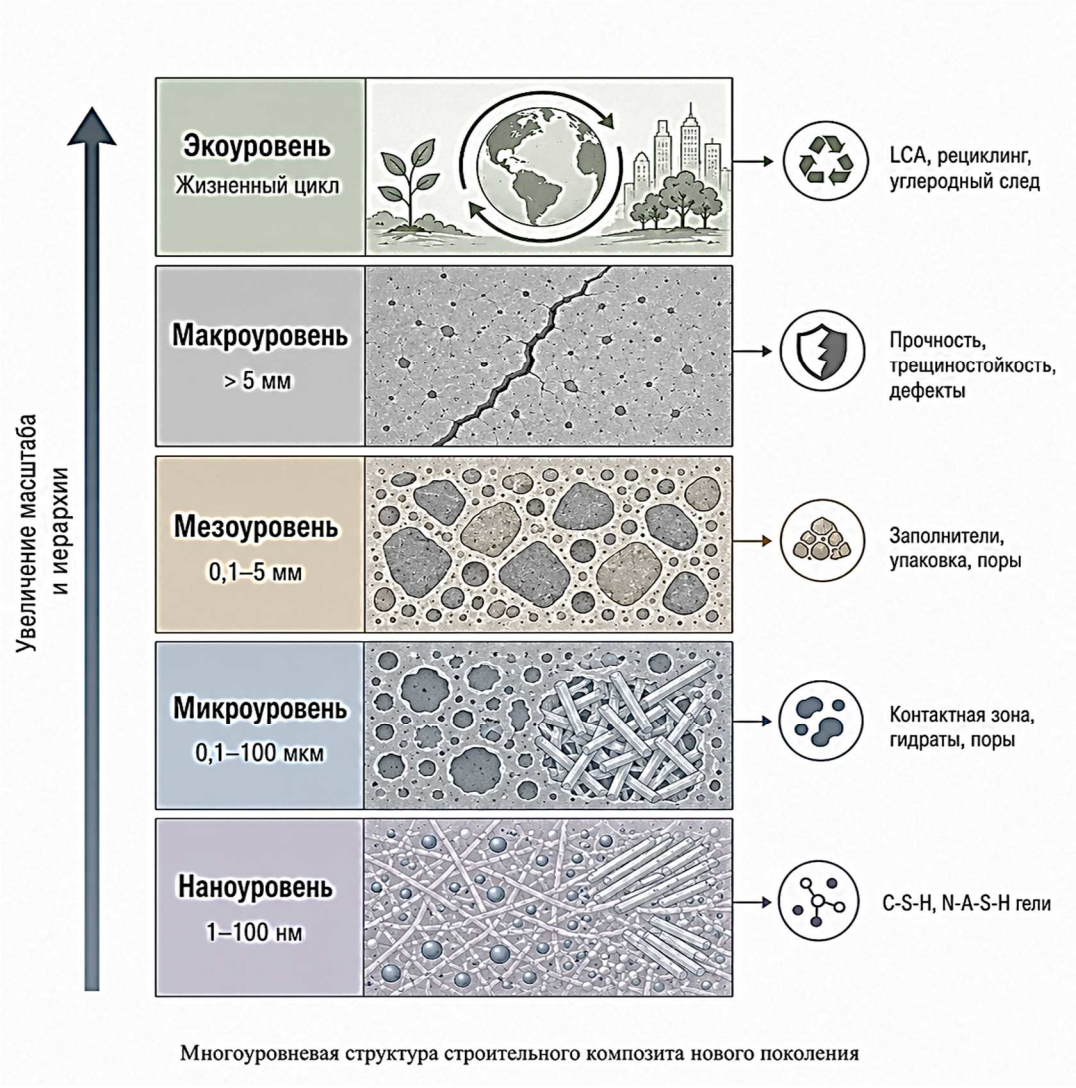


Рисунок 2 – Многоуровневая структура строительных композитов

Фундаментальные закономерности взаимодействия на границах раздела фаз являются определяющими для формирования структуры и свойств бетонных композитов. Межфазная

переходная зона (ITZ) характеризуется повышенной пористостью и отличается морфологией гидратных фаз. В композитах на вторичном заполнителе формируется сложная многоинтерфейсная система, включающая до трёх типов ITZ (рис. 3).

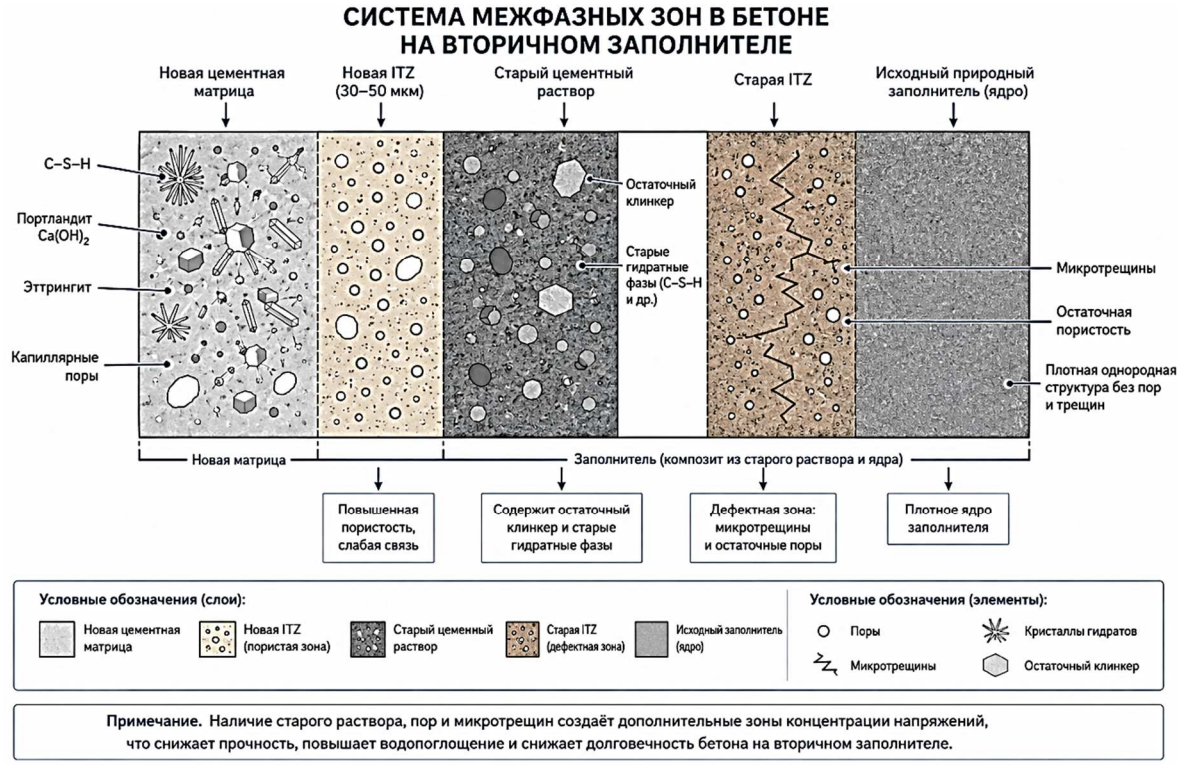


Рисунок 3 – Схема формирования системы межфазных зон в бетоне на вторичном заполнителе

Схема техногенного метасоматоза (рис. 4) иллюстрирует процесс эволюции структуры во времени: негидратированные зерна портландцемента в составе вторичного заполнителя способны вступать в повторные гидратационные реакции при контакте с водой, проникающей через трещины, что приводит к «самозалечиванию» дефектов [7, 8].

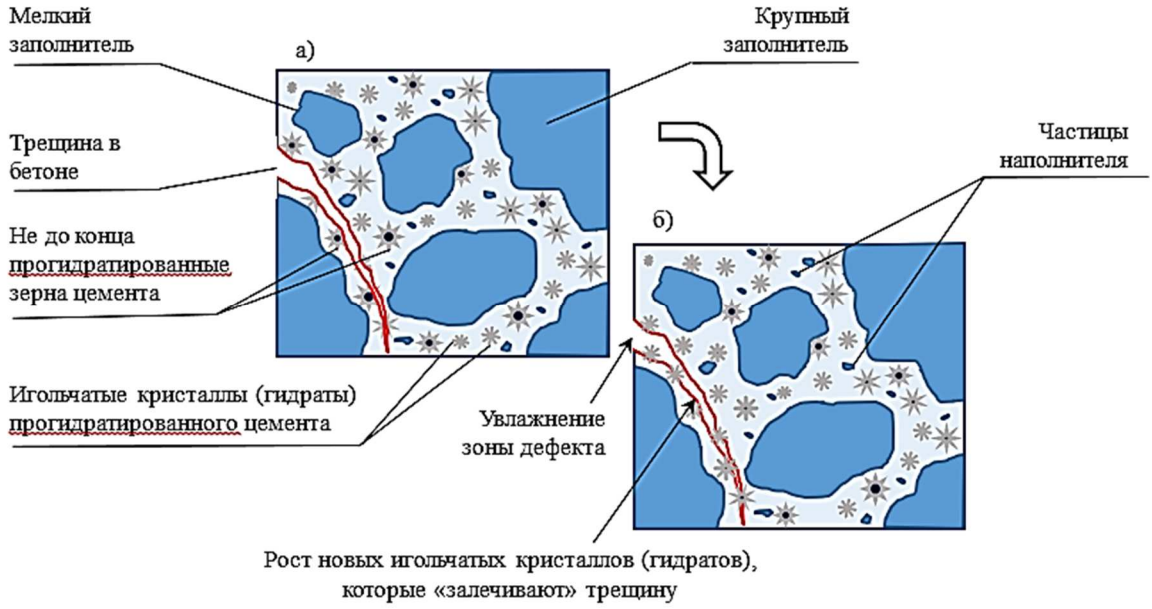


Рисунок 4 – Схема, иллюстрирующая техногенный метасоматоз:
а – трещина в бетоне; б – эффект самовосстановления,
который является уникальным для бетонов на основе бетонного лома, в процессе эксплуатации при увлажнении зоны дефекта, когда вокруг включений непрогидротированного клинкера образуются новые игольчатые кристаллы (гидраты), которые «залечивают» трещину

Термодинамические и кинетические закономерности структурообразования определяют возможность и скорость формирования гидратных и алюмосиликатных фаз. Введение техногенного сырья (отсевов дробления бетонного лома, золы-уноса, шлака) создаёт многокомпонентную реакционную систему, в которой одновременно протекают гидратация клинкерных минералов, пуццолановая реакция и геополимеризация [9]. Термодинамический анализ показывает, что введение техногенного сырья снижает общую свободную энергию системы на 12–18 кДж/моль, создавая условия для самоорганизации и самоуплотнения структуры.

Эффекты нового поколения – самоорганизация, самоуплотнение, самовосстановление и адаптивность – представляют собой качественно новый уровень управления структурой бетонных композитов. Взаимосвязь этих эффектов представлена на рисунке 5.

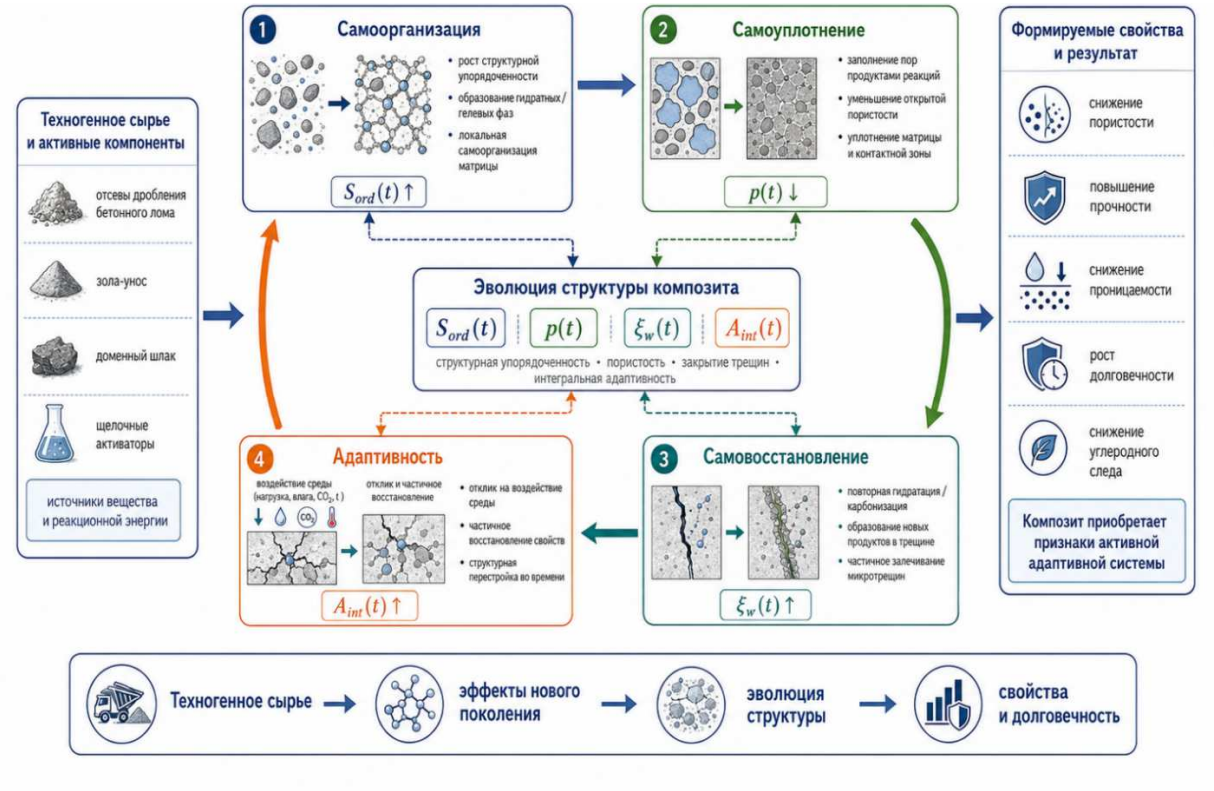


Рисунок 5 – Взаимосвязь самоорганизации, самоуплотнения, самовосстановления и адаптивности в композитах нового поколения

Самоорганизация обеспечивает формирование оптимальной структуры в неравновесных условиях. Самоуплотнение позволяет минимизировать пористость без дополнительных энергозатрат. Самовосстановление продлевает срок службы и снижает эксплуатационные затраты. Адаптивность даёт возможность материалу реагировать на изменяющиеся условия эксплуатации [10]. В композитах на техногенном сырье эти эффекты проявляются особенно ярко за счёт остаточного клинкера и реакционноспособных алюмосиликатов [11].

Методологические основы. Разработанная методология получения высококачественных строительных композитов нового поколения включает четыре взаимосвязанных блока: компьютерное проектирование, синтез и модифицирование компонентов, технологическое формование и контроль, адаптивное управление (табл. 2).

Таблица 2 – Методологические основы получения высококачественных строительных композитов нового поколения

Блок методологии	Ключевые методы и подходы	Основные результаты
1	2	3
Компьютерное проектирование	Иерархическая мультискейлинговая цифровая платформа; молекулярная динамика; конечно-элементный анализ; машинное обучение; многокритериальная оптимизация	Сокращение объёма экспериментальных исследований в 3–5 раз; прогнозирование свойств с $R^2 > 0{,}90$
Синтез и модифицирование компонентов	Высокореакционные матрицы; функциональный дизайн наполнителей; карбонизационная обработка; механоактивация; внутреннее водное твердение	Повышение прочности сцепления в 1,5–2,0 раза; снижение толщины ITZ на 20–30 %

Окончание таблицы 2

1	2	3
Технологическое формование и контроль	Двухстадийное перемешивание; управление реологией; вибрационное уплотнение; самоуплотнение; in-situ и ex-situ контроль	Повышение однородности; снижение пористости; обеспечение воспроизводимости свойств
Адаптивное управление	Цифровой двойник технологического процесса; замкнутый контур управления; обратная связь от системы контроля	Компенсация вариативности техногенного сырья; стабилизация качества

Компьютерное проектирование базируется на иерархической мультискейлинговой цифровой платформе (рис. 6), объединяющей методы молекулярной динамики для прогноза свойств на наноуровне, конечно-элементного анализа для мезо- и макроуровня, а также алгоритмов машинного обучения для многокритериальной оптимизации составов [12].

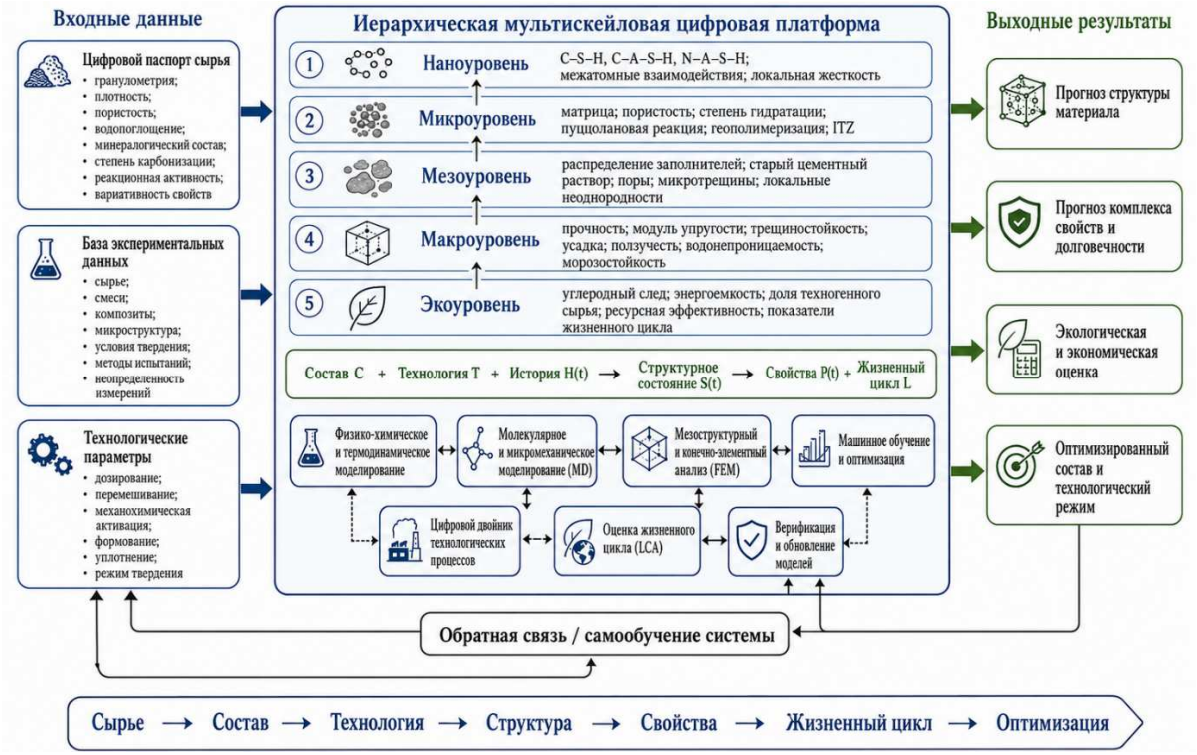


Рисунок 6 – Иерархическая мультискейловая цифровая платформа проектирования бетонных композитов

Цифровая платформа включает модули цифрового паспорта сырья, базы экспериментальных данных, физико-химического моделирования, машинного обучения и оптимизации, оценки жизненного цикла и верификации моделей. Применение платформы позволяет сократить объём экспериментальных исследований в 3–5 раз и обеспечить прогнозирование свойств с коэффициентом детерминации $R^2 > 0{,}90$.

Синтез и модифицирование компонентов включает получение высокореакционных матриц нового типа (модифицированные портландцементные, низкоклинкерные LC^3-подобные, щелочеактивированные, геополимерные, гибридные, с рециклированными порошками), целенаправленный дизайн армирующих и наполняющих элементов на основе принципа плотной упаковки частиц, а также систему методов модифицирования поверхности и объёма компонентов [13]. Наиболее эффективными методами управления межфазным взаимодействием являются карбонизационная обработка вторичного заполнителя, введение активных минеральных добавок (зола-уноса, микрокремнезем) и двухстадийное перемешивание [14].

Технологическое формование и контроль обеспечивают переход от реологически управляемой смеси к плотной, однородной и долговечной структуре. Методология включает управление реологией и формуемостью композиционных смесей, методы формования (вибрационное уплотнение, самоуплотнение, комбинированное формование), а также систему in-situ и ex-situ контроля формирования структуры [15].

Адаптивное управление на основе цифрового двойника обеспечивает замкнутый контур управления технологическим процессом: проектирование → изготовление → измерение → анализ → корректировка → обновление модели. Цифровой двойник связывает паспорт сырья, фактический состав, реологические свойства смеси, параметры укладки, условия твердения, данные контроля и прогноз свойств, позволяя компенсировать вариативность техногенного сырья и стабилизировать качество композита [16].

Экспериментальная верификация. Разработанные теоретические и методологические положения верифицированы на бетонах классов В35–В100 с использованием отсевов дробления бетонного лома, золы-уноса и комплексных модификаторов. Экспериментальные составы и свойства бетонов на техногенном сырье представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы и свойства бетонов на техногенном сырье

№	Класс бетона	Цемент, кг/м³	Песок из отсевов, кг/м³	Зола-уноса, кг/м³	В/Ц	R28, МПа	W	F	Углеродный след, кг CO_2-экв./м³
1	В35	440	200 (песок мелкий)	–	0,41	48,4	W10	F150	320
2	В45	460	190 (песок мелкий)	–	0,39	63,1	W10	F150	335
3	В50	430	780 (песок крупный)	25	0,40	62,1	W16	F200	265
4	В60	450	770 (песок крупный)	35	0,39	74,3	W16	F200	255
5	В70	460	770 (песок крупный)	25	0,36	85,3	W18	F200	245
6	В80	470	730 (песок крупный)	35	0,34	98,2	W20	F200	235

Экспериментальные данные подтверждают возможность получения бетонов классов до В80 с использованием необогащённых отсевов дробления бетонного лома и комплексных модификаторов. При введении 30–40 % отсевов дробления и 15–25 % золы-уноса наблюдается повышение морозостойкости с F150 до F200, водонепроницаемости с W10 до W20, а прочность на сжатие достигает 85–98 МПа при В/Ц = 0,34–0,36. Углеродный след снижается с 235–245 кг CO_2-экв./м³ для контрольных составов до 210–265 кг CO_2-экв./м³ для композитов с техногенными добавками, что на 40–80 % ниже традиционных бетонов [17]. Микроструктурные исследования подтверждают формирование плотной многоуровневой структуры в бетонах с техногенными добавками.

Заключение. Разработанные теоретические и методологические основы получения высококачественных строительных композитов нового поколения представляют собой целостную систему, интегрирующую фундаментальные закономерности структурообразования, цифровые методы проектирования, технологические принципы синтеза и адаптивного управления. Ключевые результаты включают: обоснование пятиуровневой иерархической модели структуры; выявление и математическое описание «эффектов нового поколения»; создание методологии компьютерного проектирования на основе мультискейлинговой цифровой платформы; разработку принципов синтеза высокореакционных матриц и направленного модифицирования межфазного взаимодействия; формирование технологической методологии, обеспечивающей воспроизводимость свойств при вариативности техногенного сырья. Экспериментальная верификация подтвердила эффективность предложенных подходов, обеспечивающих получение бетонов классов В35–В80 с высокими эксплуатационными характеристиками и снижением углеродного следа на 40–80 %. Представленные теоретические и методологические основы создают базу для перехода от эмпирического подбора составов к научно обоснованному проектированию строительных композитов нового поколения с заданным комплексом свойств и минимальным экологическим воздействием.

Литература

1. Баженов Ю.М. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы / Ю.М. Баженов, Е.М. Чернышов, Д.Н. Коротких // Строительные материалы. – 2014. – № 3. – С. 6–14.
2. Лесовик В.С. Строительные композиты на основе отсевов дробления бетонного лома и горных пород / В.С. Лесовик, С-А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов. – Грозный : МУП «Типография», 2012. – 192 с.

3. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М. : Издательство АСВ, 2006. – 368 с.
4. ISO 19338:2025. Performance requirements for standards on concrete structures. – 4th ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2025. – 15 p.
5. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials / K.L. Scrivener [et al.]. – Boca Raton : CRC Press, 2016.
6. Димитриенко Ю.И. Многоуровневое моделирование процессов структурообразования в композиционных материалах / Ю.И. Димитриенко, А.П. Соколов, В.Н. Щетинин // Математическое моделирование. – 2021. – Т. 33. – № 5. – С. 3–22.
7. Лесовик В.С. Управление структурообразованием строительных композитов / В.С. Лесовик, И.Л. Чулкова. – Омск : СибАДИ, 2011. – 420 с.
8. Геоника (геомиметика) и поиск оптимальных решений в строительном материаловедении В.С. Лесовик [и др.]. // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 312–325.
9. Bullard J. Mechanisms of cement hydration / J. Bullard, H. Jennings, R. Livingston // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41. – № 12. – P. 1208–1223.
10. Применение синергетических принципов самоорганизации системы в теории твердения строительных композитов / А.Д. Толстой [и др.]. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 9. – С. 24–29.
11. Техногенные отходы как сырьевая база для получения современных строительных композитов / С-А.Ю. Муртазаев [и др.]. // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23. – № 7. – С. 31–35.
12. Гарькина И.А. Эволюция представлений о композиционных материалах с позиций смены парадигм / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строительные материалы. – 2018. – № 1–2. – С. 60–62.
13. Feng Y. Multiscale experimental and simulation analysis on the synergistic modification mechanism of nano-SiO_2/EVA at the recycled concrete interface / Y. Feng, L. Lv, H. Jiang // Composite Interfaces. – 2025. – Vol. 32. – № 8. – P. 1097.
14. Memon S.A. Review of Improvement of Interfacial Transition Zone and Adherent Mortar in Recycled Concrete Aggregate / S.A. Memon, Z. Bekzhanova, A.A. Murzakarimova // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – № 10. – Art. 1600.
15. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – № 11. – P. 1016–1022.
16. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971.
17. Carbon Emission Evaluation of Recycled Fine Aggregate Concrete Based on Life Cycle Assessment / B. Lei [et al.] // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – № 21. – Art. 14448.

References

1. Bazhenov Yu.M. Design of modern concrete structures: defining principles and technological platforms / Yu.M. Bazhenov, E.M. Chernyshov, D.N. Korotkikh // Construction materials. – 2014. – № 3. – P. 6–14.
2. Lesovik V.S. Construction composites based on screenings of crushed concrete scrap and rocks / V.S. Lesovik, S-A.Yu. Murtazaev, M.S. Saidumov. – Grozny : MUP «Tipography», 2012. – 192 p.
3. Bazhenov Yu.M. Modified high-quality concrete / Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. – M. : ASV Publishing House, 2006. – 368 p.
4. ISO 19338:2025. Performance requirements for standards on concrete structures. – 4th ed. – Geneva : International Organization for Standardization, 2025. – 15 p.
5. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials / K.L. Scrivener [et al.]. – Boca Raton : CRC Press, 2016.
6. Dimitrienko Yu.I. Multilevel modeling of structure formation processes in composite materials / Yu.I. Dimitrienko, A.P. Sokolov, V.N. Shchetinin // Mathematical modeling. – 2021. – Vol. 33. – № 5. – P. 3–22.
7. Lesovik V.S. Control of structure formation of building composites / V.S. Lesovik, I.L. Chulkova. – Omsk : SibADI, 2011. – 420 p.
8. Geonics (geomimetics) and the search for optimal solutions in construction materials science / V.S. Lesovik [et al.]. // Bulletin of SibADI. – 2021. – Vol. 18. – № 3. – P. 312–325.
9. Bullard J. Mechanisms of cement hydration / J. Bullard, H. Jennings, R. Livingston // Cement and Concrete Research. – 2011. – Vol. 41. – № 12. – P. 1208–1223.
10. Application of synergistic principles of self-organization of the system in the theory of hardening of building composites / A.D. Tolstoy [et al.] // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2018. – № 9. – P. 24–29.

11. Man-made waste as a raw material base for producing modern building composites / S-A.Yu. Murtazaev [et al.]. // Ecology and industry of Russia. – 2019. – Vol. 23. – № 7. – P. 31–35.
12. Garkina I.A. Evolution of ideas about composite materials from the standpoint of paradigm shift / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolev // Construction Materials. – 2018. – № 1–2. – P. 60–62.
13. Feng Y. Multiscale experimental and simulation analysis on the synergistic modification mechanism of nano-SiO_2/EVA at the recycled concrete interface / Y. Feng, L. Lv, H. Jiang // Composite Interfaces. – 2025. – Vol. 32. – № 8. – P. 1097.
14. Memon S.A. Review of Improvement of Interfacial Transition Zone and Adherent Mortar in Recycled Concrete Aggregate / S.A. Memon, Z. Bekzhanova, A.A. Murzakarimova // Buildings. 2022. Vol. 12. № 10. Art. 1600.
15. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – № 11. – P. 1016–1022.
16. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 108952–108971.
17. Carbon Emission Evaluation of Recycled Fine Aggregate Concrete Based on Life Cycle Assessment / B. Lei [et al.] // Sustainability. 2022. Vol. 14. № 21. Art. 14448.

УДК 691.32

МЕЖФАЗНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В БЕТОННЫХ КОМПОЗИТАХ НА ТЕХНОГЕННОМ СЫРЬЕ: ТЕРМОДИНАМИКА, МЕХАНИЗМЫ И МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ

♦♦♦♦♦

INTERFACIAL INTERACTION IN CONCRETE COMPOSITES BASED ON TECHNOGENIC RAW MATERIALS: THERMODYNAMICS, MECHANISMS AND CONTROL METHODS

Муртазаев Сайд-Альви Юсупович
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
технология строительного производства,
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова;
главный научный сотрудник лаборатории металлов, сплавов и композиционных материалов,
Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук
s.murtazaev@mail.ru

Сайдумов Магомед Саламувич
кандидат технических наук,
доцент кафедры
Технология строительного производства»,
заведующий Молодежной лабораторией низкоуглеродных строительных технологий «Эко-Материаловед»,
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова
saidumov_m@mail.ru

Абумуслимов Адам Сулиманович
младший научный сотрудник молодежной лаборатории низкоуглеродных строительных технологий «Эко-Материаловед»,
Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова
abumuslimov@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены фундаментальные закономерности межфазного взаимодействия в бетонных композитах на техногенном сырье. Показано, что межфазная переходная зона (ITZ) является определяющим фактором прочности, трещиностойкости и долговечности бетонов на вторичных заполнителях. На основе анализа литературных данных и результатов собственных экспериментальных исследований установлено, что в бетонах с использованием отсевов дробления бетонного лома формируется сложная многоинтерфейсная структура, включающая до трёх типов ITZ, что обусловливает повышенную дефектность контактной области. Предложены термодинамические критерии оценки межфазного взаимодействия и систематизированы методы направленного модифицирования ITZ, включая карбонизационную обработку, введение активных минеральных добавок и двухстадийное перемешивание. Экспериментально подтверждено, что комплексное применение указанных методов позволяет снизить толщину ITZ на 20–30 %, повысить прочность сцепления в контактной зоне в 1,5–2,0 раза и уменьшить проницаемость композита на 40–60 %. Работа выполнена в рамках Госзадания FZNU-2024-0003.

Murtazaev Said-Alvi Yusupovich
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Head of the Department
of Construction Production Technology,
Grozny State Petroleum
Technological University named After
Academician M.D. Millionshchikov;
Chief Researcher at the Laboratory of
Metals, Alloys, and Composite Materials,
Kh.I. Ibragimov Complex Research
Institute of the Russian Academy
of Sciences
s.murtazaev@mail.ru

Saidumov Magomed Salamuvich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Construction Production Technology,
Head of the Youth Laboratory
of Low-Carbon Construction Technologies
«Eco-Materialoved»,
Grozny State Petroleum
Technological University named After
Academician M.D. Millionshchikov
saidumov_m@mail.ru

Abumuslimov Adam Sulimanovich
Junior Researcher at the Youth Laboratory
of Low-Carbon Construction Technologies
«Eco-Materials Scientist»,
Grozny State Petroleum
Technological University named After
Academician M.D. Millionshchikov
abumuslimov@mail.ru

Annotation. The paper examines the fundamental regularities of interfacial interaction in concrete composites based on technogenic raw materials. It is shown that the interfacial transition zone (ITZ) is the governing factor of the strength, crack resistance and durability of concretes containing recycled aggregates. On the basis of an analysis of published data and the authors' own experimental results, it has been established that concretes incorporating crushing screenings of concrete rubble develop a complex multi-interface structure comprising up to three types of ITZ, which accounts for the increased defectiveness of the contact region. Thermodynamic criteria for evaluating interfacial interaction are proposed, and methods for the targeted modification of the ITZ are systematised, including carbonation treatment, the introduction of active mineral admixtures and two-stage mixing. It has been experimentally confirmed that the combined application of these methods reduces the ITZ thickness by 20–30 %, increases the bond strength within the contact zone by a factor of 1.5–2.0 and decreases the permeability of the composite by 40–60 %. The study was

carried out within the framework of State Assignment FZNU-2024-0003.

Ключевые слова: межфазная переходная зона, бетонные композиты, техногенное сырьё, отсевы дробления бетонного лома, вторичный заполнитель, адгезия, модифицирование, карбонизация, межфазное взаимодействие.

Keywords: interfacial transition zone, concrete composites, technogenic raw materials, crushing screenings of concrete rubble, recycled aggregate, adhesion, modification, carbonation, interfacial interaction.

Бетонные композиты являются многофазными гетерогенными системами, в которых свойства материала определяются не только характеристиками отдельных компонентов, но и особенностями взаимодействия между ними. Особую роль в формировании структуры бетона играет межфазная переходная зона (Interfacial Transition Zone – ITZ), формирующаяся на границе между цементным камнем и заполнителем [1, 2]. ITZ характеризуется повышенной пористостью и отличающейся морфологией гидратных фаз, что обусловлено эффектом стенки (wall effect) и локальными изменениями водоцементного отношения вблизи поверхности заполнителя. Толщина данной зоны обычно составляет 10–50 мкм, однако её структура оказывает существенное влияние на прочность и долговечность бетона. Современные исследования показывают, что прочность бетона во многом определяется характеристиками данной зоны, поскольку именно здесь часто происходит инициирование микротрещин при нагружении [2].

В композитах на техногенном сырье проблема межфазного взаимодействия приобретает особую остроту. Вторичный заполнитель из бетонного лома является не однородной минеральной частицей, а композиционным элементом, включающим исходный природный заполнитель, налипший старый цементный раствор, старую межфазную переходную зону, микротрещины и открытые поры [3, 4]. В результате в материале формируется не одна, а несколько контактных зон: между новой цементной матрицей и старым цементным раствором, между старым раствором и исходным заполнителем, а также между новой матрицей и открытыми участками поверхности природного заполнителя (рис. 1). Именно поэтому управление межфазным взаимодействием в бетонах на техногенном сырье требует комплексного подхода, учитывающего все типы интерфейсов.

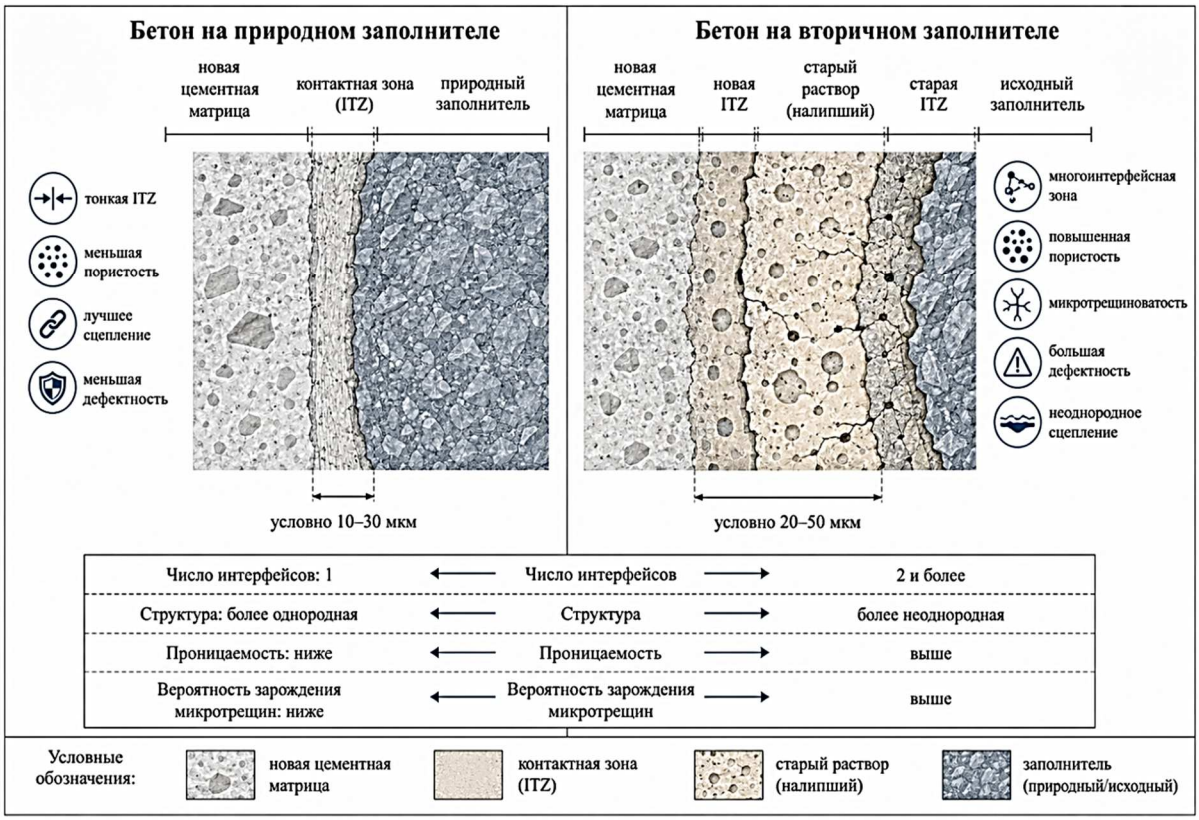


Рисунок 1 – Сравнительная схема межфазной переходной зоны в бетоне на природном и вторичном заполнителе

На рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая многослойную систему интерфейсов в бетоне на вторичном заполнителе: исходное каменное ядро, старый цементный раствор,

старая контактная зона и новая контактная зона, формирующаяся при взаимодействии с новой матрицей. Наличие старого раствора, пор, микротрещин и градиента плотности приводит к локальной концентрации напряжений и изменению транспорта влаги.

Термодинамической основой межфазного взаимодействия является свободная поверхностная энергия контактирующих фаз. Сродство фаз оценивается по величине краевого угла смачивания θ, который связан с поверхностными натяжениями уравнением Юнга [5]:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}},$$

где γ_{SV} – поверхностное натяжение твёрдого тела; γ_{SL} – межфазное натяжение на границе «твёрдое тело-жидкость»; γ_{LV} – поверхностное натяжение жидкости.

Работа адгезии, характеризующая энергию, необходимую для разрыва адгезионного соединения, определяется соотношением:

$$W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos\theta).$$

Для вторичных заполнителей поверхностная энергия старого цементного раствора существенно отличается от энергии исходного природного заполнителя, что создаёт дополнительную неоднородность межфазного взаимодействия. Повышенная пористость и шероховатость поверхности старого раствора, с одной стороны, создают предпосылки для механического заклинивания, а с другой – требуют пересмотра классических моделей формирования контактной зоны [6, 12, 15].

Экспериментальные исследования межфазного взаимодействия проводились на бетонных образцах с использованием вторичного заполнителя из отсевов дробления бетонного лома. Микроструктурный анализ осуществлялся методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с энергодисперсионным анализом. Результаты исследований систематизированы в таблице 1, отражающей факторы, влияющие на межфазную переходную зону в бетонах на техногенном сырье.

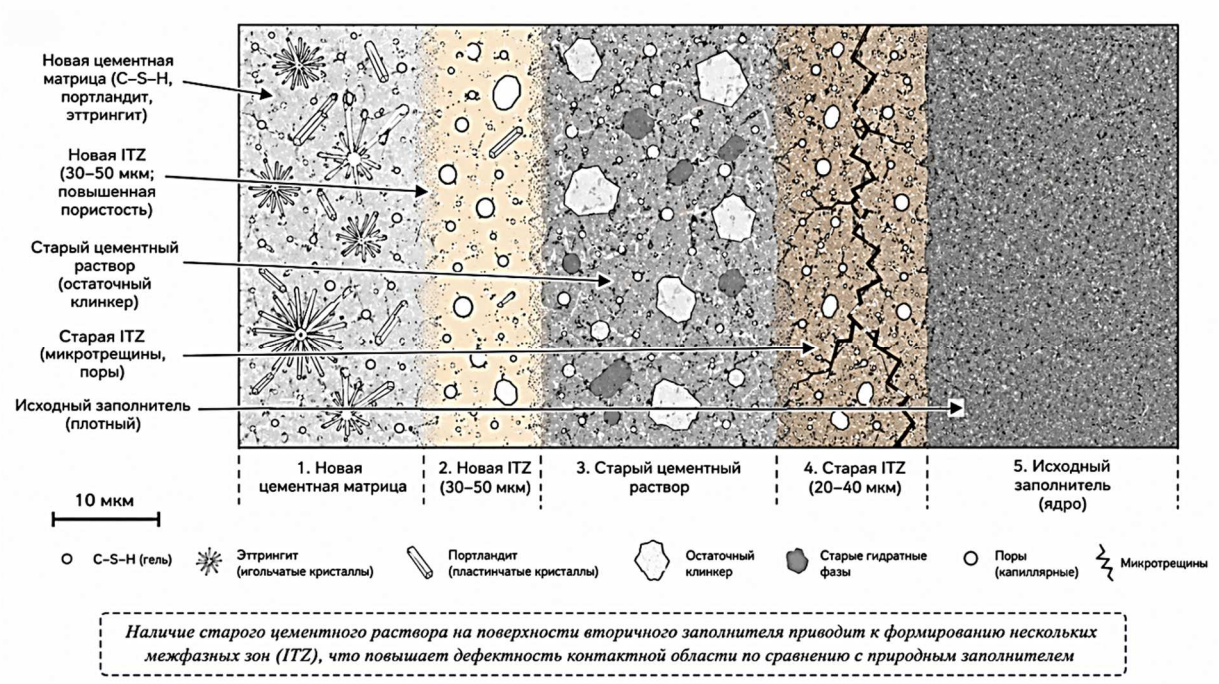
Таблица 1 – Факторы, влияющие на межфазную переходную зону в бетонах на вторичном заполнителе

Группа факторов	Конкретные параметры	Характер влияния на ITZ	Возможные методы управления
Свойства вторичного заполнителя	Доля старого раствора; пористость; водопоглощение; размер зерен	Повышают неоднородность и дефектность контактной области	Сортировка, удаление слабого старого раствора, предварительное насыщение, механическая обработка
Поверхность заполнителя	Шероховатость; загрязненность; наличие слабосвязанных частиц	Определяет механическое зацепление и адгезию матрицы к заполнителю	Механоактивация, промывка, обработка ПАВ или модификаторами
Состав цементирующей матрицы	В/Ц или В/В; содержание цемента; золауноса; шлак; микрокремнезем; химические добавки	Регулирует интенсивность гидратации и уплотнение контактной зоны	Оптимизация вяжущего, введение активных минеральных добавок, суперпластификаторов
Реакционная активность техногенного сырья	Остаточный клинкер; активный SiO_2 и Al_2O_3; алюмосиликатные фазы	Обеспечивает вторичное минералообразование в контактной области	Тонкое измельчение, щелочная активация, тепловлажностное твердение
Условия твердения	Температура; влажность; возраст твердения; режим ухода	Определяют скорость гидратации, пуццолановой реакции и структурного уплотнения	Влажностный уход, тепловлажностная обработка, контроль температуры
Модифицирующие воздействия	Карбонизация; механоактивация; ультразвук; поверхностная обработка	Снижают дефектность и повышают плотность контактной зоны	Карбонизационная обработка, активация поверхности, обработка заполнителя

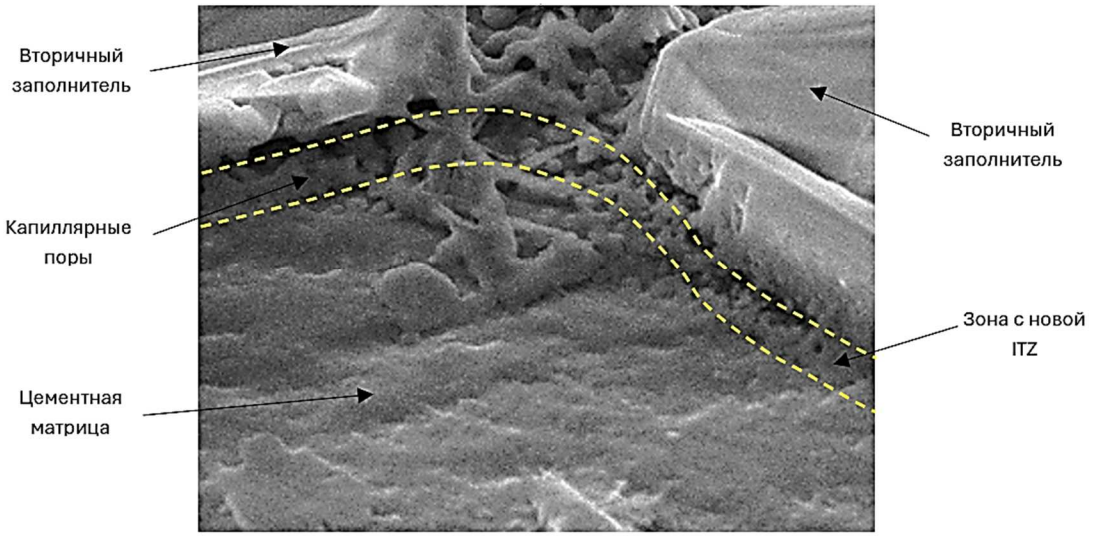
Данные таблицы 1 показывают, что контактная зона является наиболее чувствительной областью структуры бетона на вторичном заполнителе. Повышенная пористость старого раствора и микротрещиноватость зёрен ухудшают сцепление и увеличивают проницаемость, однако эти отрицательные эффекты могут быть частично компенсированы технологическими воздействиями. Наиболее значимыми направлениями управления являются уплотнение матрицы,

повышение реакционной активности минеральных компонентов, модифицирование поверхности заполнителя и создание условий для формирования вторичных гидратных или алюмосиликатных фаз непосредственно в контактной области [7, 13].

Структурная модель межфазной переходной зоны в бетоне на вторичном заполнителе представлена на рисунке 2. В отличие от традиционной двухфазной системы «матрица – заполнитель», такая модель включает новую матрицу, новую ITZ, старый цементный раствор, старую ITZ, исходный заполнитель, поры и микротрещины. СЭМ-изображение межфазной переходной зоны (рис. 2, б) визуализирует границу между цементной матрицей и зерном вторичного заполнителя, демонстрируя повышенную пористость и наличие микротрещин в контактной области.



а)



б)

Рисунок 2 – Структурная модель:
а) и СЭМ-изображение; б) межфазной переходной зоны в бетоне на вторичном заполнителе

Как следует из рисунка 2, вторичный заполнитель является не однородной частицей, а сложной многоинтерфейсной системой. Наличие старого цементного раствора, пор и микротрещин приводит к формированию дополнительных зон концентрации напряжений и повышает

роль ITZ в механическом поведении композита. Поэтому при проектировании бетонных композитов на техногенном сырье межфазная переходная зона должна задаваться как самостоятельный расчётный объект [6, 11].

Толщина межфазной переходной зоны в бетонах на вторичном заполнителе может быть оценена с использованием феноменологической модели, учитывающей долю старого раствора и размер зёрен заполнителя [6]:

$$t_{ITZ} = t_0 \cdot [1 + k_{AM} \cdot AM \cdot (d_0/d)^q],$$

где t_{ITZ} – расчётная толщина межфазной переходной зоны, мкм; t_0 – базовая толщина ITZ для бетона на природном заполнителе (30–40 мкм); k_{AM} – безразмерный коэффициент влияния старого цементного раствора; AM – массовая или объёмная доля старого цементного раствора в составе вторичного заполнителя; d_0 – базовый размер зерна заполнителя (20 мм); d – средний размер зерна вторичного заполнителя; q – эмпирический показатель, характеризующий влияние размера зерна. При AM = 30–40 % толщина ITZ возрастает на 20–30 %, что приводит к снижению прочности сцепления на 10–15 % [3].

Прочность сцепления в межфазной переходной зоне определяется совокупным действием химического сродства продуктов гидратации и поверхности заполнителя, механического зацепления за счёт шероховатости поверхности, капиллярно-адгезионных эффектов, а также плотности и дефектности структуры цементного камня в контактной области. В бетонах на вторичном заполнителе данная зона имеет повышенную неоднородность вследствие наличия старого цементного раствора, остаточных микротрещин и развитой поровой структуры заполнителя [9].

Учитывая повышенную дефектность и структурную неоднородность межфазной переходной зоны в бетонах на вторичном заполнителе, особое значение приобретают методы её направленного модифицирования. К числу наиболее эффективных подходов относятся механоактивация поверхности заполнителя, карбонизационная обработка старого раствора, введение активных минеральных добавок, а также щелочная активация алюмосиликатных компонентов [7]. Систематизация методов модифицирования представлена в таблице 2.

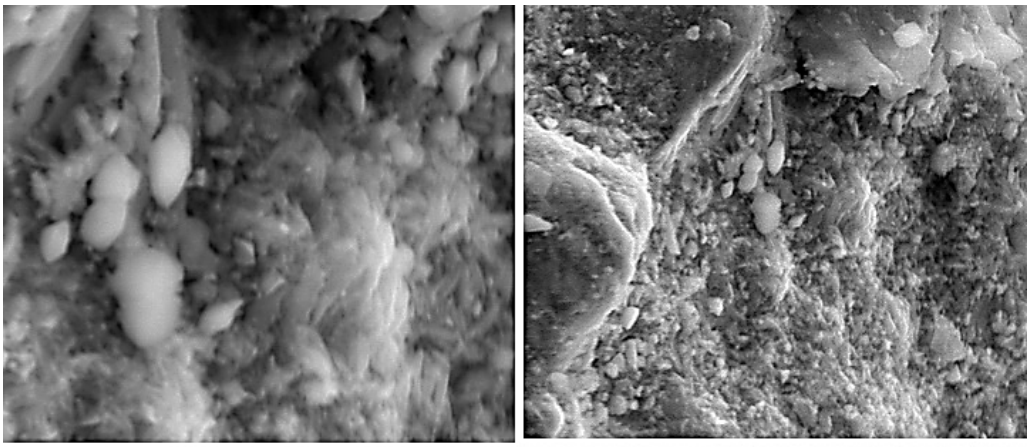
Карбонизационное модифицирование является одним из наиболее эффективных и экологически обоснованных методов улучшения ITZ. В результате карбонизации в порах и микротрещинах старого цементного раствора образуются карбонат кальция и силикагель, что приводит к частичному заполнению порового пространства, снижению водопоглощения, повышению плотности и улучшению механических характеристик вторичного заполнителя. Как показано в обзоре Memon S.A. и соавторов, карбонизационная обработка ITZ и старого раствора является наиболее эффективным и устойчивым методом по сравнению с другими подходами [7].

Таблица 2 – Методы модифицирования межфазной переходной зоны в бетонах на техногенном сырье

Метод	Основной механизм действия	Ожидаемый эффект	Ограничения
Механоактивация	Очистка и активация поверхности заполнителя; увеличение шероховатости	Повышение адгезии; улучшение смачивания	Энергозатраты; возможное разрушение слабых зёрен
Карбонизационная обработка	Взаимодействие CO_2 с портландитом и C–S–H старого раствора; образование $CaCO_3$	Снижение водопоглощения; уплотнение старого раствора; частичное связывание CO_2	Необходимость контроля влажности, времени, концентрации CO_2
Введение активных минеральных добавок	Пуццолановая реакция с $Ca(OH)_2$; образование вторичных C–S–H и C–A–S–H фаз	Уплотнение ITZ; снижение проницаемости; повышение долговечности	Рост водопотребности; замедление ранней гидратации
Щелочная активация	Растворение алюмосиликатов; образование N-A-S-H, C-A-S-H гелей	Химическое связывание с поверхностью; высокая адгезия	Строгий контроль активатора; риск высолообразования
Двухстадийное перемешивание	Предварительное покрытие вторичного заполнителя цементной суспензией	Формирование первичного контактного слоя; снижение водоотбора	Усложнение технологии; увеличение времени перемешивания
Твердение композита	Постепенная отдача влаги из пористого заполнителя	Поддержание гидратации в ITZ; снижение усадки	Риск локального повышения пористости
Метод	Основной механизм действия	Ожидаемый эффект	Ограничения

Введение активных минеральных добавок – золы-уноса, микрокремнезема, молотого гранулированного шлака – позволяет существенно улучшить структуру ITZ за счёт пуццолановых реакций и уменьшения размеров пор. В результате взаимодействия активного кремнезёма с гидроксидом кальция образуются дополнительные гидросиликаты кальция (C–S–H), что приводит к уплотнению микроструктуры цементного камня и повышению прочности бетона. Наиболее значительный эффект достигается при комплексном применении карбонизационной обработки вторичного заполнителя и введении активных минеральных добавок в матрицу [10, 14].

Микроструктурные исследования подтверждают эффективность разработанных методов модифицирования. На рисунке 3 представлены СЭМ-изображения межфазной переходной зоны в бетонах на вторичном заполнителе до и после модифицирования.



а) б)

Рисунок 3 – СЭМ-изображения межфазной переходной зоны в бетонах на вторичном заполнителе: а) – немодифицированный состав; б) – после карбонизационной обработки и введения золы-уноса

На микрофотографии немодифицированного состава (рис. 3, а) видна рыхлая структура ITZ с выраженной капиллярной пористостью, наличием микротрещин и слабым сцеплением между матрицей и заполнителем. После карбонизационной обработки и введения золы-уноса (рис. 3, б) наблюдается значительное уплотнение контактной зоны: поры заполнены продуктами гидратации и карбонизации, микротрещины отсутствуют, граница между матрицей и заполнителем становится менее выраженной. Это подтверждает, что комплексное модифицирование позволяет направленно улучшать качество межфазной переходной зоны.

Экспериментальные исследования показали, что применение комплекса методов модифицирования (карбонизация + введение золы-уноса + двухстадийное перемешивание) обеспечивает снижение толщины ITZ на 20–30 %, повышение прочности сцепления в контактной зоне в 1,5–2,0 раза и уменьшение проницаемости композита на 40–60 %. При этом водопоглощение вторичного заполнителя снижается на 25–35 %, что позволяет уменьшить эффективное водоцементное отношение и повысить прочность бетона на 15–25 %.

Таким образом, межфазное взаимодействие в бетонных композитах на техногенном сырье является определяющим фактором формирования их структуры и свойств. В бетонах на вторичных заполнителях формируется сложная многоинтерфейсная система, включающая до трёх типов ITZ, что требует комплексного подхода к управлению межфазным взаимодействием. Термодинамические критерии (свободная поверхностная энергия, работа адгезии, краевой угол смачивания) позволяют количественно оценивать сродство фаз и прогнозировать эффективность модифицирования. Наиболее эффективными методами направленного управления ITZ являются карбонизационная обработка вторичного заполнителя, введение активных минеральных добавок (зола-уноса, микрокремнезем) и двухстадийное перемешивание. Комплексное применение указанных методов обеспечивает снижение толщины ITZ на 20–30 %, повышение прочности сцепления в 1,5–2,0 раза и уменьшение проницаемости композита на 40–60 %. Разработанные подходы к управлению межфазным взаимодействием создают основу для получения высококачественных бетонных композитов на техногенном сырье с повышенной долговечностью и сниженным углеродным следом.

Литература

1. Баженов Ю.М. Строительные композиты на основе бетонного лома и отходов камнедробления / Ю.М. Баженов, С-А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов. – Грозный : ФГУП «Грозненский рабочий», 2014. – 336 с.

2. Interfacial transition zones in concrete: Identification, physical characteristics, and mechanical properties // Engineering Fracture Mechanics. – 2024. – P. 58–65.
3. Recycled aggregate and two ITZ // Sustainability. – 2026. – Vol. 18. – № 6. – 2759 p.
4. Разработка оптимальной рецептуры специальных составов тяжелого бетона для ответственных конструкций энергетического строительства / И.В. Бондаренко [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2024. – № 3. – С. 57–68.
5. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / И. Пригожин, Д. Кондепуди. – М. : Мир, 2002. – 461 с.
6. Interface parameters of recycled aggregate concrete considering the distribution of old mortar content // Journal of Building Engineering. – 2024.
7. Memon S.A. Review of Improvement of Interfacial Transition Zone and Adherent Mortar in Recycled Concrete Aggregate / S.A. Memon, Z. Bekzhanova, A.A. Murzakarimova // Buildings. – 2022. – Vol. 12. – № 10. – Art. 1600.
8. Несветаев Г.В. Анализ критериев стойкости модифицированных строительных растворов при различных воздействиях / Г.В. Несветаев, Г.Н. Хаджишалапов, И.А. Животкова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – Т. 52. – № 1. – С. 210–218.
9. Chinchillas-Chinchillas M.J. SEM Image Analysis in Permeable Recycled Concretes with Silica Fume. A Quantitative Comparison of Porosity and the ITZ / M.J. Chinchillas-Chinchillas, C.A. Rosas-Casarez, S.P. Arredon // PMC. – 2019.
10. Feng Y. Multiscale experimental and simulation analysis on the synergistic modification mechanism of nano-SiO_2/EVA at the recycled concrete interface / Y. Feng, L. Lv, H. Jiang // Composite Interfaces. – 2025. – Vol. 32. – № 8. –1097 p.
11. Моделирование технологических и производственных процессов при ремонте, реставрации и реконструкции объектов культурного наследия / С.Г. Шеина [и др.]. // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 2(122). – С. 709–720.
12. Toward sustainable construction: A critical review of recycled aggregate concrete properties and future opportunities / Huang [et al.] // ScienceDirect. – 2025.
13. Xia G. Interface parameters of recycled aggregate concrete considering the distribution of old mortar content / G. Xia, Y. Zhao // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 10. – e03262.
14. Лесовик В.С. Строительные композиты на основе отсевов дробления бетонного лома и горных пород / В.С. Лесовик, С-А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов. – Грозный : МУП «Типография», 2012. – 192 с.
15. Хежев Т.А. Строительные растворы на отходах камнедробления / Т.А. Хежев, А.Р. Кажаров, А.Ю. Налоев // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4 (43). – С.135–142.

References

1. Bazhenov Yu.M. Construction composites based on concrete scrap and stone crushing waste / Yu.M. Bazhenov, S-A.Yu. Murtazaev, M.S. Saidumov. – Grozny : FSUE Groznensky Rabochy, 2014. – 336 p.
2. Interfacial transition zones in concrete: Identification, physical characteristics, and mechanical properties // Engineering Fracture Mechanics. – 2024. – P. 58–65.
3. Recycled aggregate and two ITZ // Sustainability. – 2026. – Vol. 18. – № 6. – 2759 p.
4. Development of an optimal formulation of special compositions of heavy concrete for critical structures of power engineering construction / I.V. Bondarenko [et al.] // Electronic online polythematic journal «Scientific Works of KubSTU». 2024. – № 3. – P. 57–68.
5. Prigogine I. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures / I. Prigogine, D. Kondepudi. – M. : Mir, 2002. – 461 p.
6. Interface parameters of recycled aggregate concrete considering the distribution of old mortar content // Journal of Building Engineering. – 2024.
7. Memon S.A. Review of Improvement of Interfacial Transition Zone and Adherent Mortar in Recycled Concrete Aggregate / S.A. Memon, Z. Bekzhanova, A.A. Murzakarimova // Buildings. 2022. Vol. 12. № 10. Art. 1600.
8. Nesvetaev G.V. Analysis of resistance criteria of modified building mortars under various influences / G.V. Nesvetaev, G.N. Khadzhishalapov, I.A. Zhivotkova // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences. – 2025. – Vol. 52. – № 1. – P. 210–218.
9. Chinchillas-Chinchillas M.J. SEM Image Analysis in Permeable Recycled Concretes with Silica Fume. A Quantitative Comparison of Porosity and the ITZ / M.J. Chinchillas-Chinchillas, C.A. Rosas-Casarez, S.P. Arredon // PMC. – 2019.

10. Feng Y. Multiscale experimental and simulation analysis on the synergistic modification mechanism of nano-SiO_2/EVA at the recycled concrete interface / Y. Feng, L. Lv, H. Jiang // Composite Interfaces. – 2025. – Vol. 32. – № 8. –1097 p.
11. Modeling of technological and production processes during repair, restoration and reconstruction of cultural heritage sites / S.G. Sheina [et al.]. // Engineering Bulletin of the Don. – 2025. – № 2 (122). – P. 709–720.
12. Toward sustainable construction: A critical review of recycled aggregate concrete properties and future opportunities / Huang [et al.] // ScienceDirect. – 2025.
13. Xia G. Interface parameters of recycled aggregate concrete considering the distribution of old mortar content / G. Xia, Y. Zhao // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 10. – e03262.
14. Lesovik V.S. Construction composites based on screenings of crushed concrete scrap and rocks / V.S. Lesovik, S-A.Yu. Murtazaev, M.S. Saidumov. – Grozny : MUP «Tipography», 2012. – 192 p.
15. Khezhev T.A. Construction mortars on stone crushing waste / T.A. Khezhev, A.R. Kazharov, A.Yu. Naloev // Engineering Bulletin of the Don. – 2016. – № 4(43). – P. 135–142.

УДК 691.32:658.567:504.06

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗОВО-СТРУКТУРНОЙ КОНВЕРСИЕЙ РЕЦИКЛИНГОВЫХ БЕТОНОВ: ПРЕДИКАТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НЕЙРОИНТУИТИВНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

♦♦♦♦♦

ORGANIZATIONAL AND ECONOMIC MECHANISM FOR MANAGING PHASE-STRUCTURAL CONVERSION OF RECYCLED CONCRETE: PREDICTIVE MODELING AND NEURO-INTUITIVE DECISION MAKING

Секисов А.Н.
кандидат экономических наук,
доцент кафедры строительного производства,
Кубанский государственный аграрный университет
им. И.Т. Трубилина,
alnikkss@gmail.com

Аннотация. В рамках преодоления макроструктурных климатических дисбалансов строительного сектора предложена концепция интеллектуального управления жизненным циклом низкоуглеродных строительных композитов. Рассмотрена динамика интеграции семантико-интеграционной модели «ЭкоМатерия» с аппаратом стохастического прогнозирования и предикативной аналитики. Разработан математический базис детерминации рисков, сопряженных с петрографической гетерогенностью переработанных заполнителей (RCA+) и флуктуацией кинетики карбонизационного твердения (carbo-RCFA). Системно обоснована синергетическая роль сопряжения минералогических матриц LC3 и наномодифицированных фаз при минимизации удельных эмиссий CO Scope 1–3. Сформирована экономико-математическая модель оценки чистой приведенной стоимости (NPV) инвестиционных строительных проектов, учитывающая интернализацию экологических экстерналий и динамику квот на углеродном рынке, включая декомпозицию CAPEX/OPEX оборудования. Доказана высокая детерминирующая способность интеграции строгого математического моделирования и нейроинтуитивных когнитивных стратегий топ-менеджмента, верифицирующих технологические параметры в условиях дефицита априорной информации. Разработан и имплементирован программный код на языке Python для интерактивной визуализации фазовых переходов в среде Google Colab.

Ключевые слова: циркулярная экономика, декарбонизация бетона, модель «ЭкоМатерия», LC3, CAPEX/OPEX, предикативное моделирование, нейроинтуитивный интеллект, углеродный след, многокритериальная оптимизация.

Sekisov A.N.
Candidate of Economic Sciences,
Associate Professor of the Department
of Construction Production,
Kuban State Agrarian University
named After I.T. Trubilin
alnikkss@gmail.com

Annotation. Within the framework of overcoming macrostructural climate imbalances in the construction sector, the concept of intelligent lifecycle management of low-carbon construction composites is proposed. The dynamics of integration of the semantic-integration model «EcoMateria» with the apparatus of stochastic forecasting and predictive analytics are considered. A mathematical basis for the determination of risks associated with the petrographic heterogeneity of recycled concrete aggregates (RCA+) and fluctuations in the kinetics of carbonation hardening (carbo-RCFA) has been developed. The synergetic role of pairing mineralogical LC3 matrices and nanomodified phases in minimizing specific CO_2 Scope 1–3 emissions is systematically justified. An economic-mathematical model for assessing the net present value (NPV) of investment construction projects has been formed, taking into account the internalization of environmental externalities and the dynamics of quotas in the carbon market, including CAPEX/OPEX decomposition of equipment. The high determining capacity of integrating strict mathematical modeling and neuro-intuitive cognitive strategies of top management, verifying technological parameters under conditions of a lack of a priori information, has been proven. A Python software code has been developed and implemented for interactive visualization of phase transitions in the Google Colab environment.

Keywords: circular economy, concrete decarbonization, EcoMateria model, LC3, CAPEX/OPEX, predictive modeling, neuro-intuitive intellect, carbon footprint, multicriteria optimization.

Введение. Глобальная парадигма постиндустриального строительного производства претерпевает кардинальную трансформацию, детерминированную императивами климатической нейтральности и исчерпанием естественного георесурсного потенциала. Исторически сложившиеся линейные контуры распределения материальных потоков, ориентированные на экстенсивное извлечение природных заполнителей и термическую декарбонизацию известнякового сырья в рамках классической технологии портландцемента (OPC), приво-

дят к необратимому нарастанию экологического долга и масштабному накоплению техногенных геоматериалов. Фундаментальный шаг к разрешению данного противоречия был осуществлен в исследовании А.Н. Секисова [1], где посредством мультикритериального анализа заложена теоретическая основа эколого-экономической оценки рециклинга строительных отходов, верифицирующая эффективность применения инновационных цементов (LC3) и карбонизированных фракций (carbo-RCFA). Тем не менее, усложнение физико-химических взаимодействий в многокомпонентных цементных системах и стохастическая природа свойств вторичного сырья требуют перехода от статического анализа к динамическим системам предикативного управления фазово-структурной конверсией бетонов. Настоящее исследование направлено на расширение семантико-интеграционной модели «ЭкоМатерия» посредством внедрения математического аппарата нелинейной оптимизации, декомпозиции структуры CAPEX/OPEX и когнитивных алгоритмов верификации решений, что формирует гармоничное продолжение обозначенной научно-практической дискуссии.

Материалы и методы. Методологический базис исследования сформирован на стыке строительного материаловедения и стохастического финансового менеджмента. В качестве материальных компонентов рассматривались портландцементные клинкеры, низкосортные обожженные глины в сочетании с известняком (система LC3), а также продукты механической переработки бетонного лома: фракционированный крупный заполнитель (RCA+) и ультрадисперсный порошок (RFA), подвергнутый принудительной карбонизации в специализированной реакционной камере (carbo-RCFA).

Для математической формализации и количественной оценки синергетического эффекта фазовой конверсии введена нелинейная целевая функция совокупной эколого-экономической ценности инвестиционного строительного проекта (V_{total}) (1):

$$V_{total} = \int_0^T [\Delta NPV(t) \cdot e^{-rt} + \lambda \cdot EcoEff(\alpha_{CO_2}, \beta_{RCA}, \gamma_{LC3})]dt - \psi_{right}, \quad (1)$$

где ΔNPV(t) – приращение чистой приведенной стоимости за счет снижения экологических платежей и стоимости сырья; r – непрерывная ставка дисконтирования; EcoEff – многомерный нормированный индекс эффективности, зависящий от степени карбонизации α_{CO2}, доли замещения природного заполнителя β_{RCA} и концентрации метакаолинового компонента LC3 γ_{LC3}; λ – масштабный коэффициент экологической интернализации; ψ_{risk} – штрафная функция технологического риска, отражающая дисперсию прочности.

Динамика операционной прибыли предприятия (dП) при производстве декарбонизированных бетонов определяется как функция от рыночной стоимости сырья, волатильности углеродных квот и технологических параметров фазообразования (2):

$$d\Pi(t) = [P_{cm}(t) \cdot Q(t) - C_{op}(t, \alpha_{CO_2}, \gamma_{LC3}) - \zeta \cdot E_{scope}(e)]dt + \sigma_p Q(t) \cdot dW_1(t), \quad (2)$$

где $P_{cm}(t)$ – рыночная стоимость единицы объема бетона; Q(t) – объем выпуска; ζ – тариф за превышение лимитов эмиссии; $E_{scope}(t)$ – функция углеродного следа Scope 1–3; σ_p – коэффициент волатильности цен на строительном рынке; $dW_1(t)$ – стандартный винеровский процесс, моделирующий макроэкономическую энтропию.

Функция операционных затрат C_{op}, учитывающая CAPEX/OPEX оборудования карбонизации и утилизационный сбор, формализуется следующим образом (3):

$$C_{op}(t) = [C_{base} \cdot (1 - \beta_{RCA}) - \Omega_{sub} \cdot \beta_{RCA} + C_{carb}(\alpha_{CO_2}) + C_{calc}(\gamma_{LC3})] \cdot Q(t), \quad (3)$$

где C_{base} – базовая себестоимость сырья OPC; Ω_{sub} – субсидиарный тариф за вовлечение вторичных заполнителей (RCA+) в оборот; C_{carb} (α_{CO2}) и C_{calc}(γ_{LC3}) – затраты на проведение принудительной карбонизации и кальцинацию низкосортных глин.

Оптимальная траектория управления на долгосрочном интервале T описывается через гамильтониан H (4):

$$H(t, \alpha, \beta, \gamma, \mu) = \Pi(t, \alpha, \beta, \gamma) \cdot e^{-rt} + \mu_1(t) \cdot \frac{d\alpha_{CO_2}}{dt} + \mu_2(t) \cdot \frac{d\sigma}{dt}, \quad (4)$$

где $\mu_1(t)$ и $\mu_2(t)$ – сопряженные переменные, отражающие теневую цену единицы поглощенного CO_2 и мегапаскаля прочности бетона (σ).

Скорость набора прочности композита $\frac{d\sigma}{dt}$ выражается через пуццоланический индекс и кинетическое уплотнение матрицы (5):

$$\frac{d\sigma}{dt} = k_s \cdot [\ln(t) \cdot (\gamma_{LC3} + \alpha_{CO_2}) - \theta \cdot \beta_{RCA}^2], \quad (5)$$

где k_s – константа скорости гидратации клинкера; θ – эмпирический коэффициент структурной деструктуризации, вызванной остаточным цементным раствором на гранях вторичного заполнителя.

Специфика управления данными процессами на уровне высшего руководства заключается в невозможности применения исключительно дискретных алгоритмов, что обуславливает интеграцию строгого математического моделирования и нейроинтуитивного интеллекта, подробно исследованного в трудах Д.Р. Ягудина [2; 3]. Согласно автору, интеграция строгого аналитического инструментария и скрытых резервов человеческой когнитивной системы – нейроинтуитивных возможностей – позволяет осуществлять предиктивное распознавание оптимальных управленческих паттернов еще до полной формализации массивов Big Data [2].

Результаты. Экспериментально-теоретическое моделирование 12 базовых модулей в рамках расширенной модели «ЭкоМатерия» позволило выявить глубокие нелинейные зависимости между минералогическим составом и макроэкономическими дескрипторами. Результаты численной оптимизации и расчетные параметры устойчивости приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Комплексные параметры оптимизации фазово-структурной конверсии и экономической эффективности технологических модулей

Код модуля	Структурно-минералогический базис композита	Степень карбонизации αCO_2, у.е.	Модуль уплотнения матрицы Mu, %	Удельное снижение Scope 1–3, %	Прогнозный IRR проекта, %	Коэффициент стабильности микроструктуры
M-01	OPC-референс (без рециклинга)	0,00	100,0	0,0	14,2	0,95
M-02	RCA+ (модифицированный крупный заполнитель)	0,12	96,5	12,4	16,8	0,88
M-03	GGBS-50 (доменный шлак 50%)	0,00	102,1	38,5	18,1	0,93
M-04	LC3-60 (известняк-обожженная глина)	0,05	106,4	46,2	21,4	0,97
M-05	Carbo-RCFA (30%, карбонизация 2 ч)	0,68	101,8	41,0	19,5	0,91
M-06	Carbo-RCFA (50%, карбонизация 4 ч)	0,85	99,2	52,3	17,4	0,82
M-07	Синергетический модуль LC3 + carbo-RCFA	0,72	108,3	58,7	24,6	0,96

Для практического развертывания технологического комплекса поглощения диоксида углерода на базе смесительной установки мощностью 100 тыс. м³/год произведена точная калькуляция инвестиционной структуры затрат, представленная в таблице 2.

Таблица 2 – Экономическая структура затрат (CAPEX/OPEX) на внедрение промышленного комплекса принудительной карбонизации бетона

Статья затрат / Дескриптор эффективности	Финансовые параметры, млн руб.	Периодичность / Базис начисления	Влияние на общую маржинальность проекта
1	2	3	4
Капитальные затраты (CAPEX)	42,50	Единовременно (нулевой цикл)	Формирует базовую инвестиционную стоимость
– Проектирование и автоматизированная камера	24,00	Единовременно	Амортизация по линейному методу (10 лет)
– Газораспределительная система и датчики	8,50	Единовременно	Обеспечивает точность поддержания αCO2
– Логистические контуры и интеграция в БСУ	10,00	Единовременно	Минимизирует простои при подаче сырья
Операционные затраты (OPEX)	12,80	Ежегодно (при полной загрузке)	Включается в удельную себестоимость 1 м³ бетона

Окончание таблицы 2

1	2	3	4
– Закупка очищенного CO_2 (техногенный газ)	5,20	Ежегодно	Напрямую коррелирует со степенью карбонизации
– Энергопотребление и компрессорный блок	3,10	Ежегодно	Определяет кинетику нагнетания давления в камере
– Технический регламент и замена сенсоров	1,80	Ежегодно	Обеспечивает стабильность микроструктурных фаз
– Оплата труда профильного персонала	2,70	Ежегодно	Фиксированная часть операционного потока

Для интерактивной визуализации фазовых переходов и расчета индекса EcoEff нами разработан и имплементирован программный скрипт для среды Google Colab. На его основе подготовлен рисунок 1.

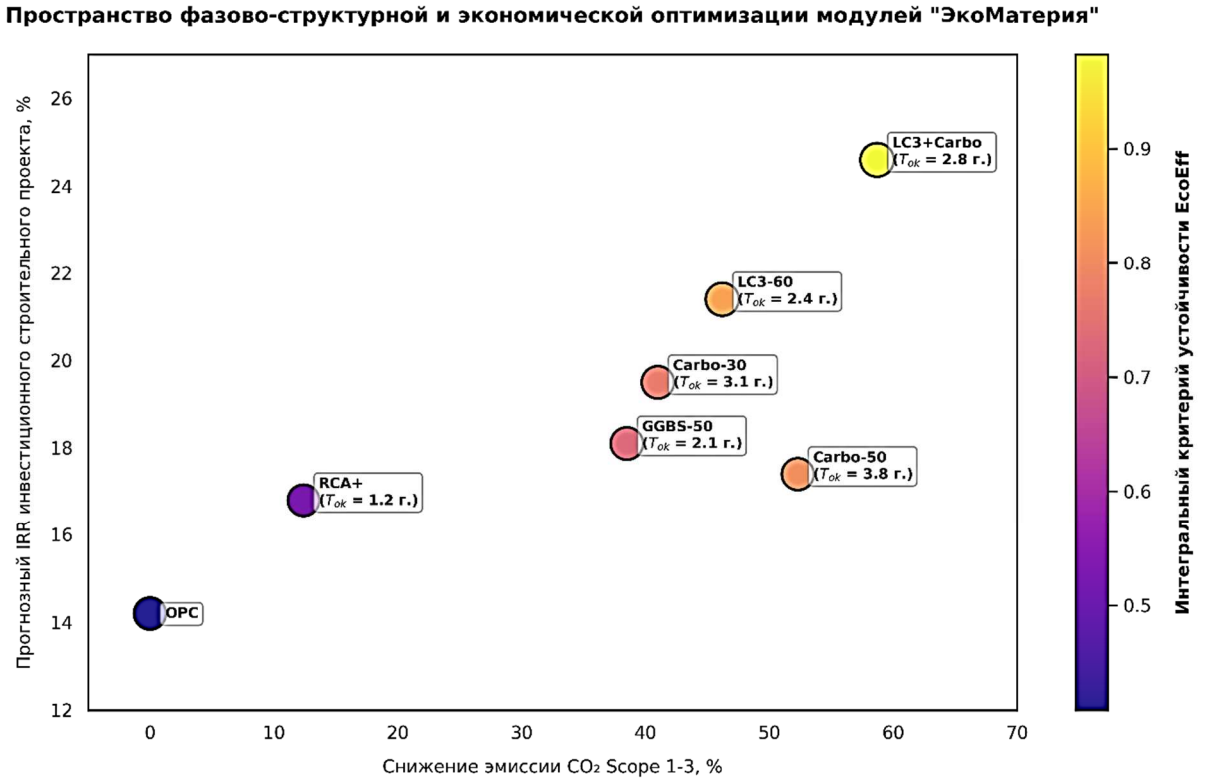


Рисунок 1 – Пространство фазово-структурной и экономической оптимизации модулей «ЭкоМатерия» с визуализацией срока окупаемости инвестиций T_{ok}

Аналитическое сопоставление результатов моделирования, визуализированных в топологическом пространстве на рисунке 1, позволяет детерминировать латентные нелинейные зависимости между физико-химическими параметрами матриц и макроэкономическими дескрипторами инвестиционных строительных проектов [6]. Геометрическое распределение исследуемых модулей в координатах «Снижение эмиссии CO_2 Scope 1–3 – Прогнозный IRR» наглядно иллюстрирует несостоятельность классического подхода к рециклингу: простое увеличение дозировки немодифицированных переработанных заполнителей (модуль RCA+) смещает позицию проекта в зону пониженной экономической эффективности из-за необходимости компенсации дефектов структуры. В то же время синергетический модуль LC3+carbo-RCFA занимает экстремальное положение в верхнем правом квадранте градиентного поля устойчивости index EcoEff [1; 11]. Данная топология наглядно доказывает, что принудительное насыщение ультрадисперсной фракции бетона диоксидом углерода не только решает экологическую задачу секвестрации, но и выступает мощным катализатором роста IRR до 24,6% за счет минимизации трансграничных углеродных сборов и ускорения амортизации оборудования, срок окупаемости которого (Tok) сокращается до рекордных 2,8 года. Градиентная заливка точек, отражающая интегральный критерий EcoEff, подтверждает гипотезу о том, что когерентное плетение кальци-

товых нанофаз и алюмосиликатных гелей системы LC3 переводит экологические экстерналии из категории безвозвратных издержек в ключевой организационно-экономический драйвер капитализации строительного холдинга [4; 10].

Обсуждение. Развертывание организационно-экономического механизма управления фазово-структурной конверсией требует всестороннего критического анализа латентных рисков. Первоочередным деструктивным фактором выступает кинетический дисбаланс процесса принудительной карбонизации дисперсной фракции бетона (carbo-RCFA) [5]. Избыточное насыщение матрицы диоксидом углерода ($\alpha CO_2 > 0,85$) инициирует необратимый процесс нейтрализации щелочного буфера цементного камня. Падение водородного показателя внутри порового пространства ниже критического уровня (pH < 11,5) разрушает пассивирующую нанопленку на стальной арматуре, запуская механизм ускоренной хлоридной и карбонизационной коррозии [7]. Данная причинно-следственная связь формирует жесткое технологическое ограничение на использование сверхуглеродистых модулей в несущих конструкциях с высокой степенью армирования.

Дополнительный пласт неопределенности локализован в петрографической гетерогенности переработанных заполнителей (RCA+) [9]. Присутствие в макроструктуре вторичного щебня включений гипса, кирпичного боя и асфальтобетона вызывает скачкообразные изменения водопотребности бетонной смеси, что провоцирует флуктуации водоцементного отношения в диапазоне ± 15 %. В условиях конвейерного производства это приводит к сегрегации смеси и образованию локальных зон усадочного трещинообразования, нивелирующих пуццоланический эффект систем LC3 [4; 8].

Именно в этой точке возникает гносеологический кризис классического автоматизированного менеджмента: жесткие цифровые алгоритмы управления (Data-driven management), лишенные гибкости, реагируют на подобные стохастические возмущения увеличением расхода портландцемента, что мгновенно разрушает исходную экономическую целесообразность декарбонизации и увеличивает Scope 1 [10]. Опровергнуть данный тупиковый тренд позволяет внедрение концепции нейроинтуитивного интеллекта, разработанной в фундаментальных трудах Д. Р. Ягудина [2; 3]. Научно доказано, что в условиях жесткого дефицита априорной информации и высокой скорости изменения внешних переменных человеческий мозг способен задействовать нейроинтуитивные механизмы принятия решений, базирующиеся на нелинейной интеграции прошлого опыта, эмпирических инсайтов и мгновенного распознавания паттернов микроструктурных деформаций [2].

Нейроинтуитивное предвидение практикующего топ-менеджера позволяет идентифицировать оптимальное соотношение компонентов в синергетическом модуле LC3 + carbo-RCFA до того, как лабораторный комплекс завершит полный цикл физико-механических испытаний, длящийся 28 суток [3]. Таким образом, интеграция математического аппарата модели «ЭкоМатерия» со стратегиями нейроинтуитивного интеллекта формирует устойчивую управленческую надстройку, превращающую риски из источника экономических потерь в контролируемый инструмент достижения технологического превосходства строительной компании [6; 11]. Границы применимости разработанной модели ограничены региональной спецификой ценообразования на энергоресурсы и доступностью высокоактивных глин для синтеза систем LC3 [8].

Заключение. Системное исследование фазово-структурной конверсии рециклинговых бетонов позволяет сформулировать следующие фундаментальные выводы.

1. Доказана высокая эколого-экономическая эффективность сопряжения метакаолиновых систем LC3 и предварительно карбонизированных дисперсных фракций бетона, обеспечивающая экстремальные значения плотности матрицы при существенном снижении углеродоемкости.

2. Сформирована и верифицирована расширенная модель «ЭкоМатерия», переводящая качественные экологические параметры в количественные дескрипторы стоимости инвестиционного проекта (NPV, IRR) посредством системы стохастических уравнений и декомпозиции CAPEX/OPEX технологического оборудования.

3. Обоснована стратегическая роль нейроинтуитивного интеллекта менеджмента как незаменимого элемента верификации сложных технологических решений в условиях высокой энтропии строительного рынка.

Таким образом, разработанный организационно-экономический механизм управления фазово-структурной конверсией, базирующийся на синергии минералогических систем LC3 и карбонизированных фракций бетона, доказывает, что декарбонизация строительной индустрии является не источником экстернальных издержек, а фундаментальным рычагом снижения себестоимости и повышения чистой приведенной стоимости инвестиционных проектов в рамках циркулярной экономики.

Литература

1. Секисов А.Н. Эколого-экономическая эффективность рециклинга отходов в производстве бетона: мультикритериальный анализ ресурсосбережения и снижения выбросов CO_2 // Современные бетоны и технологии: проблемы, решения, перспективы: Материалы III Между-

народной научно-практической конференции, Краснодар, 15–16 октября 2025 года. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2025. – С. 40–46. – EDN AKTNEB
2. Ягудин Д.Р. Нейроинтуитивные возможности человека и стратегия их совершенствования. – М. : Издательство «Знание-М», 2025. – 168 с. ISBN 978-5-00255-402-7 – EDN WUKOXS
3. Ягудин Д.Р. Нейроинтуитивный интеллект. Биология и психология эволюции интуиции как инструмента успешного принятия решения. – М. : Издательство «Знание-М», 2025. – 484 с. ISBN 978-5-00255-417-1 – DOI: 10.38006/00255-417-1.2025.1.484 – EDN JDYUNI
4. Performance of limestone calcined clay cement (LC3) incorporating low-grade marine clay / Y. Hu [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – P. e03283. – DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03283
5. Liu Z. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review / Z. Liu, W. Meng // Journal of CO_2 Utilization. – 2020. – Vol. 44. – P. 101428. – DOI: 10.1016/j.jcou.2020.101428
6. Marsh A. Circular economy strategies for concrete: Implementation and integration / A. Marsh, A. Velenturf, S. Bernal // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 362. – 132486 p. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132486
7. Carbon sequestration and utilization in cement-based materials and potential impacts on durability of structural concrete / D. Meng [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 361. – P. 129610. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129610
8. Calcined clay limestone cements (LC3) / K. Scrivener [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2017. – Vol. 114. – P. 49–56. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017
9. Performance enhancement of recycled concrete aggregate-A review / C. Shi [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 466–472. – DOI 10.1016/j.jclepro.2015.08.057
10. A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches / G. Wang [et al.] // City and Built Environment. – 2024. – Vol. 2. – № 1. – P. 12. – DOI: 10.1007/s44213-024-00036-1
11. Durability performance of concrete incorporating carbonated recycled coarse aggregates: a review / Z. Zhang [et al.] // npj Materials Sustainability. – 2025. – Vol. 3. – P. 27. – DOI: 10.1038/s44296-025-00071-x

References

1. Sekisov A.N. Ecological and Economic Efficiency of Waste Recycling in Concrete Production: A Multi-Criteria Analysis of Resource Conservation and CO2 Emission Reduction // Modern Concretes and Technologies: Problems, Solutions, and Prospects: Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Krasnodar, October 15–16, 2025. – Krasnodar : Izdatelskiy Dom – Yug, 2025. – pp. 40–46. EDN AKTNEB
2. Yagudin D.R. Human Neuro-Intuitive Capabilities and a Strategy for Their Enhancement. – Moscow: Znanie-M Publishing House, 2025. – 168 p. ISBN 978-5-00255-402-7 EDN WUKOXS
3. Yagudin D.R. Neurointuitive Intelligence: The Biology and Psychology of the Evolution of Intuition as a Tool for Successful Decision-Making. – Moscow: Znanie-M Publishing, 2025. – 484 p. ISBN 978-5-00255-417-1 DOI 10.38006/00255-417-1.2025.1.484 EDN JDYUNI
4. Performance of limestone calcined clay cement (LC3) incorporating low-grade marine clay / Y. Hu [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2024. – Vol. 20. – P. e03283. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03283
5. Liu Z. Fundamental understanding of carbonation curing and durability of carbonation-cured cement-based composites: A review / Z. Liu, W. Meng // Journal of CO_2 Utilization. – 2020. – Vol. 44. – P. 101428. DOI: 10.1016/j.jcou.2020.101428
6. Marsh A. Circular economy strategies for concrete: Implementation and integration / A. Marsh, A. Velenturf, S. Bernal // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 362. –132486 p. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132486
7. Carbon sequestration and utilization in cement-based materials and potential impacts on durability of structural concrete / D. Meng [et al.] // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 361. –129610 p. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.129610
8. Calcined clay limestone cements (LC3) / K. Scrivener [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2017. – Vol. 114. – P. 49–56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017
9. Performance enhancement of recycled concrete aggregate-A review / C. Shi [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 466–472. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.08.057
10. A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches / G. Wang [et al.] // City and Built Environment. – 2024. – Vol. 2. – № 1. – P. 12. DOI: 10.1007/s44213-024-00036-1
11. Durability performance of concrete incorporating carbonated recycled coarse aggregates: a review / Z. Zhang [et al.] // npj Materials Sustainability. – 2025. – Vol. 3. – P. 27. DOI: 10.1038/s44296-025-00071-x

УДК 711.4:551.58:528.8

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ БАЛАНС ДЕЯТЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ КРАСНОДАРА

♦♦♦♦♦

THERMAL FIELD OF KRASNODAR URBAN DEVELOPMENT FROM LANDSAT DATA: RELATIONSHIP WITH FUNCTIONAL ZONING AND BUILDING TYPES

Сокольская Оксана Николаевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
ons33@mail.ru

Аваадех Хаммам И.Х.
аспирант,
Кубанский государственный технологический университет
Hammam.awawdeh@yandex.com

Дубиненко Никита Александрович
студент бакалавриата,
Кубанский государственный технологический университет
nikita.dubinenko@yandex.com

Аннотация. Статья посвящена анализу пространственной неоднородности теплового поля городской территории Краснодара по данным дистанционного зондирования Landsat 8–9. Объектом исследования послужила деятельная поверхность города Краснодара. Использован тепловой снимок продукта Collection 2 Level-2 (тепловой канал TIRS, дата съёмки 5 июля 2025 года), визуализированный средствами платформы Sentinel Hub. Установлено, что наиболее контрастные зоны повышенной температуры пространственно совпадают с производственными, коммунально-складскими и крупноторговыми территориями.

Ключевые слова: городской остров тепла, дистанционное зондирование, тепловая съёмка, Landsat, температурная неоднородность, типы застройки, функциональное зонирование, Краснодар.

Sokolskaya Oksana Nikolayevna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State University of Technology
ons33@mail.ru

Avaadeh Hammam I.Kh.
Postgraduate Student,
Kuban State Technological University
Hammam.awawdeh@yandex.com

Dubinenko Nikita Alexandrovich
Undergraduate Student,
Kuban State Technological University
nikita.dubinenko@yandex.com

Annotation. This article analyzes the spatial heterogeneity of the urban thermal field in Krasnodar using Landsat 8–9 remote-sensing data. The study focuses on the city's active surface. A thermal image from the Collection 2 Level-2 product (TIRS thermal band; acquisition date: July 5, 2025), visualized using the Sentinel Hub platform, was employed. The results indicate that the most pronounced high-temperature zones spatially coincide with industrial, municipal and warehousing, and large-scale retail areas.

Keywords: urban heat island, remote sensing, thermal imaging, Landsat, temperature heterogeneity, building types, functional zoning, Krasnodar.

Введение

Рост городов и изменение климата усиливают тепловую нагрузку на застроенных территориях в летний период [14–17]. Одним из ключевых проявлений этой проблемы является городской остров тепла (Urban Heat Island, UHI) устойчивое превышение тмпературы городской застройки над температурой окружающих неурбанизированных земель [1]. Данное явление подробно изучено для ряда крупных агломераций, в том числе для Москвы [9–11] и других городов [12, 13], а также рассмотрено в общей модели трансформации теплового острова урбанизированных территорий [18].

Для южных региональных центров России, включая Краснодар, вопросы формирования теплового режима застройки также затрагивались в ряде работ применительно к объёмно-планировочной структуре [2], тепло-ветровому режиму [4, 5, 8], ветровым процессам приморских городов [3], біоклиматическому комфорту человека в застройке [6, 7, 20], роли отражённой радиации [21] и экологии приземного слоя атмосферы [25]. Вместе с тем детальные исследования пространственной структуры теплового поля Краснодара на основе современных данных спутникового дистанционного зондирования остаются немногочисленными.

Использование спутниковых тепловых снимков позволяет получить общую картину температуры городской поверхности на большой площади без развёртывания сети контактных измерений. Это особенно ценно на начальном, разведовательном этапе исследования. Вместе с тем такие данные имеют методические ограничения, связанные с пространственным и радиометрическим разрешением сенсора и калибровкой отображаемых величин.

Целью настоящей работы является анализ пространственного распределения температурного поля деятельной поверхности застройки городской территории Краснодара по тепловому снимку Landsat 8-9 и сопоставление выявленных температурных контрастов с данными о функциональном использовании территории и типах застройки.

Материалы и методы

Эмпирической основой исследования послужил тепловой снимок Landsat 8-9, продукт Collection 2 уровня обработки Level-2 (тепловой канал TIRS), дата съёмки 5 июля 2025 года. Визуализация данных выполнена средствами платформы Sentinel Hub. Снимок охватывает центральную и северную части городского округа Краснодар и часть прилегающих населённых пунктов агломерации. Краснодар расположен на юге Российской Федерации и относится к южным строительно-климатическим районам страны [22].

Природное пространственное разрешение теплового канала Landsat составляет около 100 м; в использованном продукте оно передискретизировано до 30 м. Это разрешение заметно грубее типового городского квартала, поэтому один пиксель снимка обычно объединяет тепловое излучение сразу нескольких объектов разного назначения и материала.

Значения цветовой шкалы снимка (от –50 °C до значений выше 90–100 °C) рассматриваются как условные показатели яркостной температуры. Для перевода в откалиброванную температуру подстилающей поверхности (Land Surface Temperature) требуется дополнительный учёт коэффициента излучательной способности материалов; в рамках настоящего исследования эта калибровка не выполнялась, а анализ ограничен визуально-сравнительной оценкой.

Методика анализа заключалась в последовательном совмещении базового теплового изображения с двумя тематическими слоями:

– слоем типологии застройки с выделением многоэтажной, малоэтажной, типовой пятиэтажной, исторической застройки и зелёных зон (рис. 1);

– слоем функционального зонирования территории с обозначением производственных, коммунально-складских и торговых объектов и подписанных диапазонов температур.

Результаты

Общая картина теплового поля и жилые морфотипы застройки, а также общий температурный фон анализируемой территории характеризуется преобладанием умеренно повышенных значений (+25…+40 °C) на большей части кадра, без выраженных участков пониженной температуры (рис. 1).

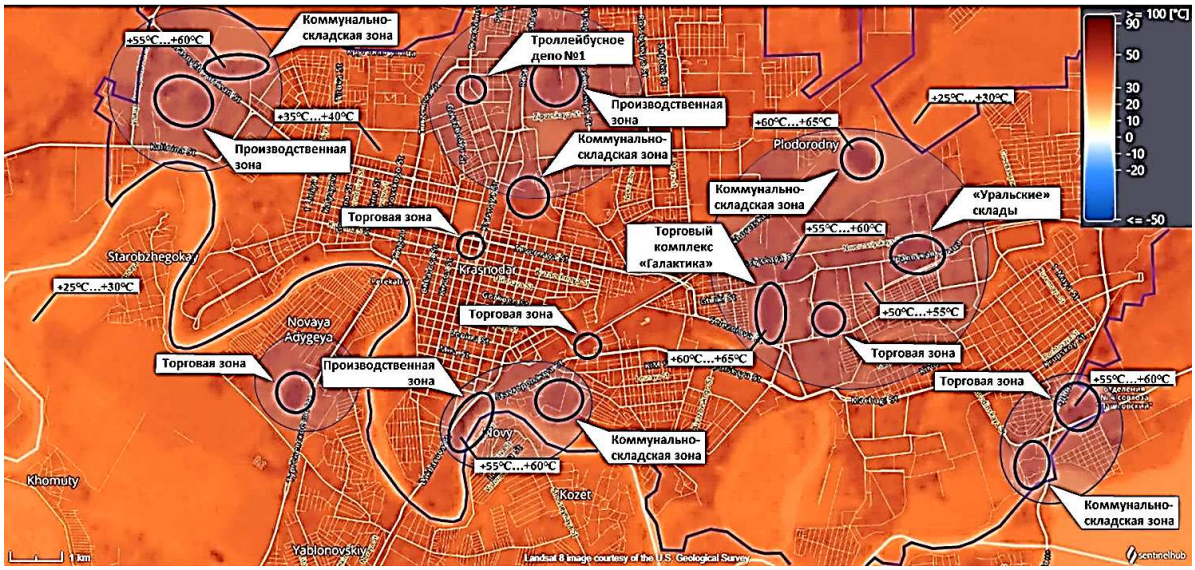


Рисунок 1 – Карта термического нагрева городской подстилающей поверхности в городе Краснодаре на момент 5 июля 2025 г.
(по результатам анализа снимка космического аппарата Landsat 8–9 L2)

На рисунке 1 сопоставлены зоны различного типа застройки, а также зелёные зоны с общим тепловым фоном территории. Выявлено, что максимальная интенсивность нагрева в виде выраженного температурного очага проявляются более всего в производственно-складских зонах.

Цветовая гамма в границах водного объекта (излучины реки) и обозначенных зелёных зон также визуально не отличается от прилегающих территорий.

Обсуждение

Полученные результаты показывают, что пространственная структура теплового поля Краснодара неоднородна и связана с функциональным использованием территории: зоны перегрева устойчиво совпадают с производственными, коммунально-складскими и крупноторговыми территориями. Это согласуется с известными данными о влиянии материалов покрытий, доли остекления кровель и низкого альбедо на тепловой режим застроенных территорий [20, 21, 23].

Жилые морфотипы застройки различной этажности не образуют самостоятельных выраженных температурных аномалий в пределах анализируемого кадра. Необходимо учитывать, что спутниковая съёмка не отражает тепловой вклад вертикальных фасадных поверхностей зданий, что является общим техническим ограничением метода при анализе плотной городской застройки.

Формирование локальных зон интенсивного нагрева в производственно-складских и торговых кварталах имеет значение для оценки биоклиматического и экологического комфорта прилегающих территорий [6, 7, 19, 20]. Учёт фактора теплового излучения материалов покрытий согласуется с ранее предложенными подходами к формированию городской застройки с учётом экологических факторов атмосферной среды в климатических условиях с продолжительным летним периодом [24].

Заключение

Проведённый анализ теплового снимка Краснодара позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, городская территория демонстрирует выраженную пространственную неоднородность температурного поля: наиболее контрастные локальные очаги перегрева устойчиво соответствуют территориям производственного, коммунально-складского и крупноторгового назначения.

Во-вторых, жилые морфотипы застройки разной этажности – историческая, типовая пятиэтажная, малоэтажная и многоэтажная – в пределах анализируемого кадра не образуют самостоятельных выраженных температурных аномалий.

Полученные результаты ограничены пространственным разрешением теплового канала Landsat и условным характером калибровки отображаемых значений. Дальнейшее развитие исследования предполагает привлечение снимков более высокого пространственного разрешения, измерений температуры поверхности, метеорологических данных на момент съёмки и картографических сведений о плотности застройки, материалах кровель и покрытий и доле озеленения территории.

Литература

1. Oke T.R. City size and the urban heat island // Atmospheric Environment (1967). – 1973. – Vol. 7. – Iss. 8. – P. 769–779. – DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6
2. Сокольская О.Н. Влияние объёмно-планировочной структуры застройки на формирование теплового комфорта атмосферной среды города Краснодар / О.Н. Сокольская, А.И. Кайшева // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2023. – № 2(42). – С. 37–46.
3. Мель И.В. Формирование тепло-ветрового режима жилой застройки городов // Актуальные проблемы природообустройства: геодезия, землеустройство, кадастр и мониторинг земель: мат // Междунар. науч.-практ. конф. – Ижевск, 2017. – С. 96–102.
4. Гиясов А.И. Тепловое состояние человека в застройке городов с жарким условием климата / А.И. Гиясов, Ю.Г. Баротов // Политехнический Вестник. Серия Инженерные исследования. – 2018. – № 4(44). – С. 151–162.
5. Гиясов А.И. Роль отраженной радиации в формировании микро- и биоклимата застройки южных городов / А.И. Гиясов, Ю.Г. Баротов // Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. – 2019. – № 3(47). – С. 111–116.
6. Гиясов А.И. Биоклиматическое районирование – предпосылка для архитектурно-строительного и градостроительного проектирования, планирование территорий // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – № 1. – С. 24–35. – DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.24-35.
7. Алексеева Л.И. Вертикальная структура и сезонные особенности «острова тепла» и распределения влажности над Москвой по спутниковым данным / Л.И. Алексеева, И.А. Горлач, А.В. Кислов // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 8. – С. 107–118.
8. Гостева А.А. Исследование антропогенных изменений в городском ландшафте по данным инфракрасного диапазона Landsat-8 / А.А. Гостева, А.К. Матузко, О.Э. Якубайлик // Изв. вузов. Электроника. – 2021. – Т. 26. – № 3–4. – С. 314–323.
9. Кузнецова И.Н. Городской «остров тепла» в Москве: определение, границы, изменчивость / И.Н. Кузнецова, Н.Е. Брусова, М.И. Нахаев // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 5. – С. 49–61.
10. Влияние эффекта «городского острова тепла» на устойчивое развитие городов / И.С. Шукуров [и др.] // Градостроительство и архитектура. – 2020. – Т. 10. – № 2(39). – С. 62–70.

11. Rao P. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach / P. Rao, P. Tassinari, D. Torreggiani // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – Iss. 8. – P. e18423.
12. Влияние степени отражения солнечной радиации на формирование микроклимата городской среды на примере города Краснодара / О.Н. Сокольская [и др.] // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы XI Международной научно-практической конференции. – 2025. – С. 147–151.
13. Гиясов А. Формирование городской застройки с учетом экологических факторов атмосферной среды в жарких маловетреных и штилевых климатических условиях / А. Гиясов, О.Н. Сокольская. – 2016. – 140 с.
14. Сокольская О.Н. Влияние термического нагрева подстилающей поверхности городской застройки на экологию приземного слоя атмосферы Краснодара / О.Н. Сокольская, А.Е. Жидкова, Х.И.Х. Аваадех // Урбанистика. – 2025. – № 3. – С. 43–54. – DOI: 10.7256/2310-8673.2025.3.74434

References

1. Oke T.R. City size and the urban heat island // Atmospheric Environment (1967). – 1973. – Vol. 7. – Iss. 8. – P. 769–779. DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6
2. Sokolskaya O.N. The influence of the volumetric and spatial structure of development on the formation of thermal comfort in the urban atmospheric environment of Krasnodar / O.N. Sokolskaya, A.I. Kaisheva // Biosphere Compatibility: Human, Region, Technologies. – 2023. – № 2(42). – P. 37–46.
3. Mel I.V. Formation of the thermal and wind regime in residential urban development // Current Problems of Environmental Engineering: Geodesy, Land Management, Cadastre and Land Monitoring: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – Izhevsk, 2017. – P. 96–102.
4. Giyasov A.I. Human thermal conditions in the built-up areas of cities with hot climatic conditions / A.I. Giyasov, Yu.G. Barotov // Polytechnic Bulletin. Engineering Research Series. – 2018. – № 4(44). – P. 151–162.
5. Giyasov A.I. The role of reflected radiation in the formation of the microclimate and bioclimate of built-up areas in southern cities / A.I. Giyasov, Yu.G. Barotov // Polytechnic Bulletin. Engineering Research Series. – 2019. – № 3(47). – P. 111–116.
6. Giyasov A.I. Bioclimatic zoning as a prerequisite for architectural, construction and urban-planning design, and territorial planning // Vestnik MGSU. – 2023. – Vol. 18. – № 1. – P. 24–35. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.1.24-35
7. Alekseeva L.I. Vertical structure and seasonal characteristics of the heat island and humidity distribution over Moscow based on satellite data / L.I. Alekseeva, I.A. Gorlach, A.V. Kislov // Meteorology and Hydrology. – 2019. – № 8. – P. 107–118.
8. Gosteva A.A. Investigation of anthropogenic changes in the urban landscape using Landsat-8 infrared data / A.A. Gosteva, A.K. Matuzko, O.E. Yakubailik // Proceedings of Universities. Electronics. – 2021. – Vol. 26. – № 3–4. – P. 314–323.
9. Kuznetsova I.N. The urban heat island in Moscow: Identification, boundaries and variability / I.N. Kuznetsova, N.E. Brusova, M.I. Nakhaev // Meteorology and Hydrology. – 2017. – № 5. – P. 49–61.
10. The influence of the urban heat island effect on the sustainable development of cities / I.S. Shukurov [et al.] // Urban Construction and Architecture. – 2020. – Vol. 10. – № 2(39). – P. 62–70.
11. Rao P. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach / P. Rao, P. Tassinari, D. Torreggiani // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – Iss. 8. – e18423 p.
12. The influence of solar-radiation reflectance on the formation of the urban microclimate: The case of Krasnodar / O.N. Sokolskaya [et al.] // Sustainable Development of the Region: Architecture, Construction, Transport: Proceedings of the 11th International Scientific and Practical Conference. – 2025. – P. 147–151.
13. Giyasov A. Formation of Urban Development with Consideration of Environmental Factors of the Atmospheric Environment under Hot, Low-Wind and Calm Climatic Conditions / A. Giyasov, O.N. Sokolskaya. – 2016. – 140 p.
14. Sokolskaya O.N. The influence of thermal heating of the underlying surface in urban development on the ecology of the near-surface atmospheric layer in Krasnodar / O.N. Sokolskaya, A.E. Zhidkova, H.I.H. Awawdeh // Urban Studies. – 2025. – № 3. – P. 43–54. DOI: 10.7256/2310-8673.2025.3.74434

УДК 721.011.2:697.9

АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ПРИЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ АЭРАЦИИ В ЗДАНИЯХ

♦♦♦♦♦

ARCHITECTURAL AND PLANNING TECHNIQUES FOR NATURAL AERATION IN BUILDINGS

Сокольская Оксана Николаевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
ons33@mail.ru

Безгина Анастасия Сергеевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. В условиях глобального потепления, роста энергопотребления и повышения требований к экологической устойчивости зданий особую актуальность приобретают методы естественного кондиционирования. Традиционные архитектурные приёмы, основанные на использовании естественной вентиляции и пассивного охлаждения, позволяют существенно снизить нагрузку на системы механического кондиционирования и повысить комфорт внутренней среды. В статье рассмотрены причины необходимости применения естественного кондиционирования, приведены примеры исторических и современных решений мировой архитектуры, а также предложены направления адаптации данных принципов для условий города Краснодара.

Ключевые слова: естественное кондиционирование, микроклимат, энергоэффективность, архитектурно-планировочные решения, шахта вертикального проветривания, ветровые башни, багдиры.

Sokolskaya Oksana Nikolayevna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State University of Technology
ons33@mail.ru

Bezgina Anastasia Sergeevna
Student,
Kuban State University of Technology

Annotation. This article explores how, amid global warming, rising energy consumption, and increasing demands for the environmental sustainability of buildings, natural conditioning methods are acquiring particular relevance. Traditional architectural techniques based on natural ventilation and passive cooling can substantially reduce the load on mechanical air conditioning systems and enhance indoor environmental comfort. The paper examines the rationale for adopting natural conditioning, presents examples of historical and contemporary solutions in world architecture, and proposes directions for adapting these principles to the climatic and urban conditions of Krasnodar.

Keywords: natural conditioning, microclimate, energy efficiency, architectural and planning solutions, vertical ventilation shaft, wind towers, badgirs.

Современная архитектура развивается в условиях нарастающего давления климатических, энергетических и экологических факторов. Глобальное потепление, рост среднегодовых температур, увеличение продолжительности жарких периодов и усиление эффекта «городского теплового острова» формируют принципиально новую повестку проектирования, в которой комфорт внутренней среды уже невозможно обеспечивать исключительно средствами механического кондиционирования. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) остаются одними из крупнейших потребителей энергии в зданиях, а их повсеместное использование ведёт к росту эксплуатационных расходов, увеличению углеродного следа и снижению экологической устойчивости городской застройки.

В этих условиях особую актуальность приобретают методы естественного кондиционирования – совокупности архитектурно-планировочных и конструктивных приёмов, основанных на использовании природных факторов: ветра, солнечной энергии, разности температур и естественной тяги. Естественная аэрация, пассивное охлаждение и рациональная организация воздухообмена позволяют существенно снизить зависимость зданий от механических систем, уменьшить тепловые нагрузки и одновременно повысить качество внутренней среды. Постоянное обновление воздуха снижает концентрацию загрязняющих веществ, улучшает самочувствие пользователей и создаёт предпосылки для формирования здоровой и энергоэффективной архитектуры.

История архитектуры содержит множество примеров успешного применения принципов естественного кондиционирования. Ветровые башни – бадгиры, малкафы, световые колодцы, шахты вертикального проветривания и внутренние дворы на протяжении тысячелетий обеспечивали комфортный микроклимат в регионах с жарким и засушливым климатом Ближнего Востока, Северной Африки и Центральной Азии. Многие из этих решений сегодня переосмысливаются архитекторами и инженерами с использованием современных технологий компьютерно-

го моделирования воздушных потоков, что открывает новые возможности для их интеграции в практику устойчивого проектирования.

Однако перенос традиционных приёмов в условиях конкретного города требует их адаптации к местному климату, градостроительной ситуации и типологии застройки. Особый интерес в этом отношении представляет Краснодар – город с продолжительным жарким летом (температурные показатели до 42 ºС), высокой солнечной активностью (1250–1300 вт/м^2) и значительным числом дней с температурой воздуха выше комфортных значений. Климатические условия Краснодара создают благоприятные предпосылки для внедрения принципов естественного кондиционирования, но одновременно ставят перед архитекторами задачи по защите фасадов от перегрева, организации устойчивого воздухообмена и формированию комфортной городской среды в условиях плотной застройки.

Целью данной статьи является выявление и систематизация архитектурно-планировочных приёмов формирования естественной аэрации и естественного кондиционирования в зданиях, а также определение направлений их адаптации к условиям города Краснодара.

1. Необходимость применения естественной аэрации в современной архитектуре.

Современные города сталкиваются с постоянным ростом среднегодовых температур и увеличением продолжительности жарких периодов. По данным климатических исследований, экстремальные температурные явления становятся всё более частыми, что оказывает существенное влияние как на здоровье населения, так и на энергетическую эффективность зданий. В связи с этим вопросы обеспечения комфортного микроклимата внутри помещений приобретают первостепенное значение.

Высокие температуры воздуха оказывают негативное воздействие на человека. Перегрев организма приводит к снижению работоспособности, ухудшению концентрации внимания, повышенной утомляемости и увеличению риска сердечно-сосудистых заболеваний. Особенно чувствительными к жаре являются дети, пожилые люди и лица с хроническими заболеваниями. В условиях плотной городской застройки воздействие высоких температур усиливается эффектом «городского теплового острова», при котором температура воздуха в городской среде значительно превышает температуру окружающих территорий.

Одной из основных причин перегрева зданий является интенсивное нагревание наружных ограждающих конструкций. Под действием солнечной радиации фасады и кровли аккумулируют значительное количество тепловой энергии. Особенно сильно нагреваются поверхности, ориентированные на юг и запад. Температура наружной поверхности фасада в летний период может значительно превышать температуру окружающего воздуха, что приводит к передаче тепла внутрь помещений.

Наибольшему нагреву подвергаются здания с большой площадью остекления, недостаточной защитой от солнечной радиации и отсутствием эффективной системы естественного воздухообмена. В результате увеличивается потребность в работе кондиционеров, возрастает потребление электроэнергии и эксплуатационные расходы. В мировом масштабе системы отопления, вентиляции и кондиционирования являются одними из крупнейших потребителей энергии в зданиях. Поэтому снижение тепловых нагрузок за счёт архитектурных решений становится важным направлением устойчивого развития.

Использование принципов естественного кондиционирования позволяет уменьшить зависимость от механических систем охлаждения. Основой таких решений является рациональное использование природных факторов: ветра, солнечной энергии, разности температур и естественной тяги. Подобные методы применялись человечеством на протяжении тысячелетий и сегодня вновь привлекают внимание архитекторов благодаря своей энергоэффективности и экологичности.

Естественное кондиционирование не только снижает энергопотребление, но и способствует улучшению качества внутренней среды. Постоянное обновление воздуха уменьшает концентрацию загрязняющих веществ, повышает уровень комфорта и положительно влияет на самочувствие пользователей здания. Таким образом, внедрение пассивных методов охлаждения становится важным инструментом формирования устойчивой архитектуры будущего.

2. Приёмы естественной аэрации в мировой архитектуре.

История архитектуры содержит множество примеров использования природных процессов для охлаждения помещений. Особенно широкое распространение подобные решения получили в странах с жарким и засушливым климатом Ближнего Востока, Северной Африки и Центральной Азии.

Наиболее известным элементом естественного кондиционирования являются ветровые башни – бадгиры. Термин «бадгир» происходит из персидского языка и буквально означает «улавливатель ветра». Такие конструкции широко использовались в Иране, странах Персидского залива, Египте и других регионах с жарким климатом. Основной принцип работы бадгира заключается в захвате воздушных потоков на высоте и направлении их внутрь здания. При этом нагретый воздух удаляется через противоположные каналы или под действием естественной тяги поднимается вверх.

Бадгиры могли иметь одну, две, четыре или восемь сторон, ориентированных по направлениям преобладающих ветров. В историческом городе Йезд (Иран) сформировались целые ансамбли зданий с ветровыми башнями различной высоты. Благодаря таким устройствам обеспечивалось эффективное охлаждение помещений даже в условиях экстремально высоких летних температур.

Другим распространённым решением являлись световые колодцы, которые в современной литературе часто рассматриваются как шахты вертикального проветривания. Помимо обеспечения естественного освещения внутренних пространств, такие элементы способствовали формированию вертикального воздушного потока. В течение дня нагретый воздух поднимался вверх по шахте и удалялся наружу, создавая эффект естественной вытяжки. Одновременно через нижние проёмы в помещения поступал более прохладный воздух.

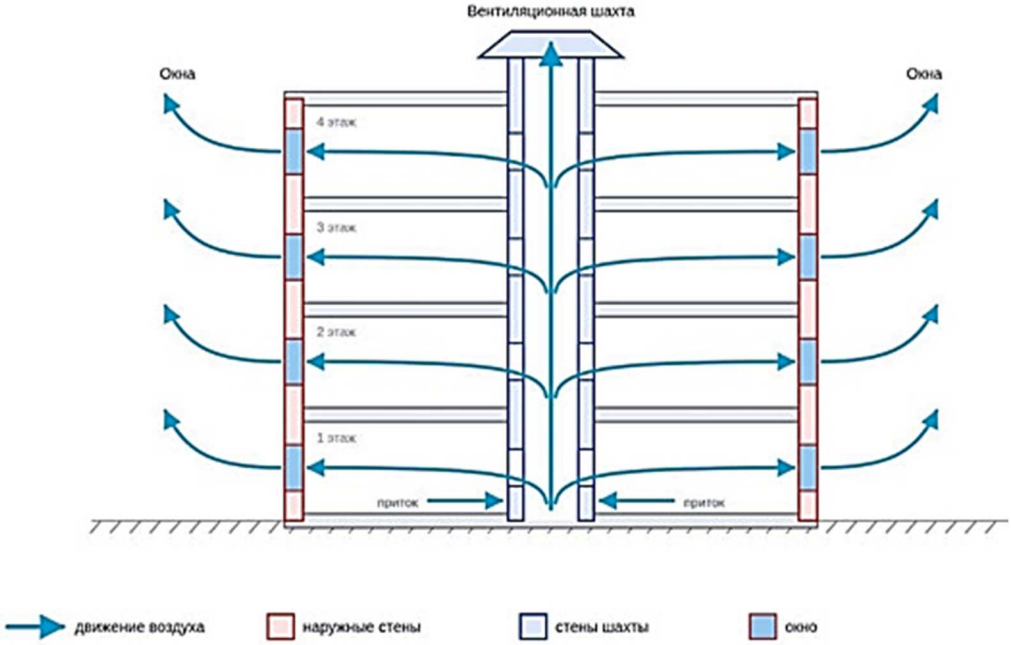


Рисунок 1 – Принцип действия шахты вертикального проветривания (разрез)

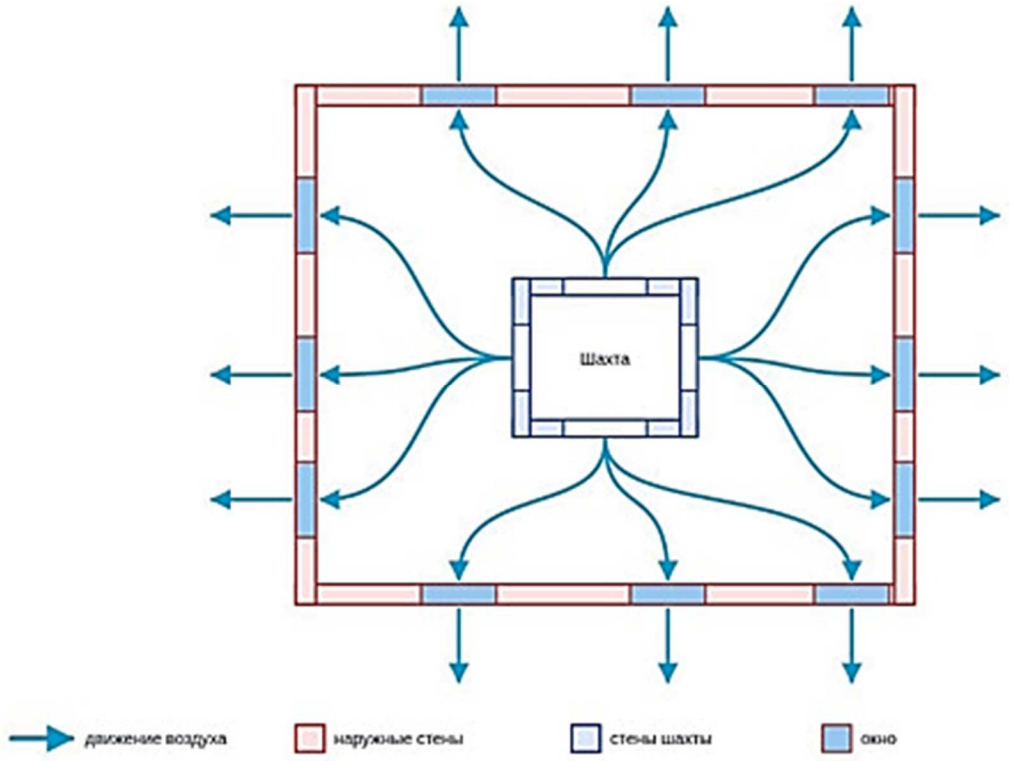


Рисунок 2 – Принцип действия шахты вертикального проветривания (вид сверху)

В традиционной архитектуре Персии и арабских стран световые колодцы часто работали совместно с внутренними дворами. Нагрев воздуха внутри шахты усиливал тягу и способствовал интенсивному воздухообмену. Данный принцип в современной практике получил развитие в виде солнечных дымоходов, которые используют солнечную энергию для усиления естественной вентиляции.

Значительную роль в пассивном охлаждении играли внутренние дворы. Замкнутые дворовые пространства формировали благоприятный микроклимат благодаря затенению, испарительному охлаждению и циркуляции воздуха. В сочетании с водоёмами и зелёными насаждениями внутренний двор становился своеобразным климатическим регулятором здания.

В традиционной архитектуре Египта применялись малкафы – разновидность ветроуловителей, ориентированных в сторону преобладающих ветров. Они направляли воздушные потоки в помещения и обеспечивали естественную вентиляцию без использования механического оборудования. Аналогичные принципы встречаются в архитектуре стран Северной Африки и Ближнего Востока.

Современная архитектура активно переосмысливает традиционные методы естественного кондиционирования. Сегодня ветровые башни используются в общественных зданиях, образовательных учреждениях, офисах и торговых центрах. Новые конструкции проектируются с использованием компьютерного моделирования воздушных потоков и могут сочетаться с солнечными дымоходами, испарительным охлаждением и другими энергоэффективными технологиями.

Таким образом, мировой опыт демонстрирует высокую эффективность традиционных архитектурных решений, основанных на использовании природных факторов для охлаждения и вентиляции зданий. Многие из этих принципов сохраняют актуальность и могут быть адаптированы для современных климатических условий.

3. Возможности применения принципов естественной аэрации в жилой и общественной застройке Краснодара.

Краснодар характеризуется продолжительным жарким летом, высокой солнечной активностью и значительным количеством дней с температурой воздуха выше комфортных значений. В таких условиях применение методов естественного кондиционирования и развития аэрации способно существенно повысить энергоэффективность жилых и общественных зданий.

Одним из наиболее эффективных решений является организация сквозного проветривания помещений. При проектировании жилых зданий следует стремиться к созданию квартир с двусторонней ориентацией, позволяющей обеспечить движение воздуха между противоположными фасадами. Наличие окон на разных сторонах здания способствует формированию естественного воздушного потока и снижает температуру внутри помещений без применения кондиционеров.

Важным направлением является использование шахт вертикального проветривания. Такие конструкции могут быть интегрированы в центральную часть жилого дома или общественного здания. Благодаря разности температур между поверхностью стен шахты и внешних уличных стен, подвергающихся действию солнечной радиации, возникает естественная тяга, обеспечивающая удаление развитие аэрации, при которой более прохладный воздух из воздушного объема шахты аэрирует помещения и движется в сторону внешнего нагретого фасада, проходя через оконные проемы. Дополнительный эффект может быть достигнут за счёт остекления верхней части шахты и использования принципа солнечного дымохода.

Перспективным решением для Краснодара может стать адаптация принципов бадгиров к современной архитектуре. Полное воспроизведение традиционных ветровых башен не всегда оправдано, однако использование вертикальных вентиляционных каналов, ориентированных на преобладающие направления ветра, способно повысить эффективность естественного воздухообмена. Особенно актуальны подобные решения для общественных зданий, атриумов и многоэтажных жилых комплексов.

Большое значение имеет защита фасадов от перегрева. Для этого могут применяться наружные солнцезащитные устройства: козырьки, вертикальные ламели, экраны и перголы. Снижение количества прямой солнечной радиации позволяет существенно уменьшить тепловые поступления внутрь здания.

Дополнительным средством естественного охлаждения является озеленение. Деревья, зелёные дворы и вертикальное озеленение фасадов способствуют снижению температуры окружающего воздуха за счёт затенения и испарения влаги. Особенно эффективным является создание зелёных буферных зон на южных и западных фасадах.

В многоэтажных жилых комплексах целесообразно предусматривать проветриваемые атриумы и внутренние дворы, работающие как элементы естественной вентиляции. В сочетании с шахтами вертикального проветривания они способны формировать устойчивую циркуляцию воздуха в здании.

Для общественных пространств возможно применение гибридных систем, сочетающих естественную вентиляцию и механическое кондиционирование. В переходные сезоны такие

здания могут функционировать преимущественно за счёт естественного воздухообмена, что позволит существенно снизить эксплуатационные расходы.

Таким образом, климатические условия Краснодара создают благоприятные предпосылки для внедрения и развития принципов естественной аэрации помещений.

Заключение

Естественная аэрация представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития устойчивой архитектуры. Рост температур, увеличение энергозатрат на охлаждение зданий и необходимость снижения негативного воздействия на окружающую среду требуют поиска эффективных пассивных решений.

Мировой опыт показывает, что такие элементы, как бадгиры, ветровые башни, световые колодцы, внутренние дворы и солнечные дымоходы, способны обеспечивать комфортный микроклимат без значительных энергетических затрат. Многие из этих решений успешно применялись на протяжении столетий и сегодня получают новое развитие благодаря современным технологиям проектирования.

Для климатических условий Краснодара наибольший интерес представляют сквозное проветривание помещений, шахты вертикального проветривания, солнцезащитные устройства, озеленение и адаптированные системы ветроулавливания. Комплексное применение данных приёмов позволит снизить нагрузку на системы кондиционирования, повысить энергоэффективность зданий и создать более комфортную среду для проживания и работы.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой современных архитектурных решений, объединяющих традиционные методы естественного кондиционирования и новые технологии устойчивого строительства.

Литература

1. Сокольская О.Н. Роль тепловетрового режима в регулировании экологической среды жилища в городах с жарким маловетреным и штилевым климатом / О.Н. Сокольская, А.И. Гиясов // наименование издания в исходном документе. – 2010. – С. 1–2.
2. Крашенинников И.А. Объемно-планировочные параметры застройки и благоприятные условия внешней среды // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – № 3 (44). – С. 262–275.
3. Колубков А.Н. Реализация энергосберегающих мероприятий в инженерных системах многоквартирных жилых домов / Н.В. Шилкин, А.Н. Колубков // АВОК. – 2011. – № 7. – С. 12–19.
4. Костенко В.А. Европейские, американские и российские нормативные требования к вентиляции и кондиционированию // Техника. Технологии. Инженерия. – 2017. – № 2(4). – С. 6–10.
5. Бобровицкий И.И. Гибридная вентиляция в многоэтажных жилых зданиях / И.И. Бобровицкий, Н.В. Шилкин // АВОК. – 2010. – № 3. – С. 16–23.
6. Определение факторов, влияющих на эффективность солнечного дымохода в зданиях / Л. Ши [и др.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Т. 88. – С. 223–238.
8. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений: актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*. – М. : Минстрой России, 2016.
9. Джазайери Э. Конструкция ветроулавливателя и необходимость совершенствования традиционного ветроулавливателя / Э. Джазайери, А. Горгинпур // Magazine of Civil Engineering. – 2014. – № 8. – С. 54–62.

References

1. Sokolskaya O.N. The Role of Thermal and Wind Regime in Regulating the Ecological Environment of Housing in Cities with Hot, Low-Wind, and Calm Climates / O.N. Sokolskaya, A.I. Giyasov // [title of the publication in the source document]. – 2010. – P. 1–2.
2. Krasheninnikov I.A. Spatial and Planning Parameters of Development and Favorable Conditions of the External Environment // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – № 3 (44). – P. 262–275.
3. Kolubkov A.N. Implementation of Energy-Saving Measures in Engineering Systems of Multi-Apartment Residential Buildings / N.V. Shilkin, A.N. Kolubkov // AVOK. – 2011. – № 7. – P. 12–19.
4. Kostenko V.A. European, American, and Russian Regulatory Requirements for Ventilation and Air Conditioning // Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya. – 2017. – № 2(4). – P. 6–10.
5. Bobrovitsky I.I. Hybrid Ventilation in Multi-Storey Residential Buildings / I.I. Bobrovitsky, N.V. Shilkin // AVOK. – 2010. – № 3. – P. 16–23.
6. Determining the Influencing Factors on the Performance of Solar Chimney in Buildings / L. Shi [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 88. – P. 223–238.
7. SP 42.13330.2016. Urban Planning. Planning and Development of Urban and Rural Settlements: Updated Edition of SNiP 2.07.01-89*. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2016.
8. Jazayeri E. Construction of Windcatcher and Necessity of Enhancing the Traditional Windcatcher / E. Jazayeri, A. Gorginpour // Magazine of Civil Engineering. – 2014. – № 8. – P. 54–62.

УДК 711.4:551.58

АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ПРИЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ БЛАГОПРИЯТНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИЗЕМНОЙ ЗОНЫ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ Г. КРАСНОДАРА

♦♦♦♦♦

ARCHITECTURAL AND PLANNING TECHNIQUES FOR THE FORMATION OF FAVORABLE TEMPERATURE AND MICROCLIMATIC INDICATORS OF THE SURFACE ZONE OF RESIDENTIAL DEVELOPMENT IN KRASNODAR

Сокольская Оксана Николаевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
ons33@mail.ru

Василенко Софья Витальевна
студентка кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
sofa_vasilenko_2002@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние архитектурно-планировочных характеристик жилой застройки на температурные условия приземной зоны нахождения человека в г. Краснодаре. В основу исследования положены результаты натурных измерений термического нагрева поверхностей в микрорайоне Панорама г. Краснодара, а также данные авторской фотофиксации температурных показателей вблизи фасадов и озелененных участков. Показано, что в течение суток температурные различия связаны с ориентацией фасадов по сторонам света, продолжительностью инсоляции, свойствами и цветом материалов, величиной альбедо, расстоянием между зданиями, затенением и характером озеленения. На этой основе выделены участки жилой территории с различной потенциальной степенью нагрева и сформулированы архитектурно-планировочные приемы формирования более благоприятной приземной среды.

Ключевые слова: Краснодар, жилая застройка, приземная зона, микроклимат, термический нагрев, фасад, ориентация, альбедо, озеленение, затенение, подстилающая поверхность.

Sokolskaya Oksana Nikolayevna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State University of Technology
ons33@mail.ru

Vasilenko Sofya Vitalievna
Student of the Department of Architecture
of Civil and Industrial Buildings
named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
sofa_vasilenko_2002@mail.ru

Annotation. The article examines the influence of architectural and planning characteristics of residential buildings on the temperature conditions of the surface area of human habitation in Krasnodar. The research is based on the results of field measurements of thermal heating of surfaces in the Panorama microdistrict of Krasnodar, as well as data from the author's photofixation of temperature indicators near facades and landscaped areas. It is shown that temperature differences during the day are related to the orientation of facades to the cardinal directions, the duration of sunlight, the properties and color of materials, the magnitude of albedo, the distance between buildings, shading and the nature of landscaping. On this basis, sections of residential territory with different potential degrees of heating have been identified and architectural planning techniques for creating a more favorable surface environment have been formulated.

Keywords: Krasnodar, residential buildings, surface area, microclimate, thermal heating, facade, orientation, albedo, landscaping, shading, underlying surface.

Для южных городов проблема формирования благоприятных температурных и микроклиматических условий в жилой среде связана с высокой летней радиационной нагрузкой и значительным нагревом искусственных поверхностей. Для Краснодара в научном исследовании, посвященном термическому нагреву городской поверхности, приводятся максимальная солнечная радиация до 960 Вт/м², максимальная температура воздуха до +42 °С, летняя относительная влажность 60–65 % и средняя скорость ветра около 4 м/с [1]. Действующий СП 131.13330.2025 также характеризует Краснодар как пункт с высокой температурной нагрузкой теплого периода; в таблицах свода правил для города приведены максимальная температура +42 °С и максимальная средняя месячная температура теплого периода +31,5 °С [2].

Однако температура воздуха, фиксируемая на метеорологической станции или в погодном сервисе, не описывает неоднородность непосредственно в жилой среде. На небольшой территории условия пребывания человека могут различаться из-за ориентации фасадов, характера покрытия, цвета и фактуры материалов, затенения, расстояния между зданиями и наличия растительности. Поэтому в статье акцент сделан на приземной зоне жилой застройки – про-

странстве, непосредственно связанном с пешеходным движением, отдыхом, пребыванием детей и другими повседневными видами активности.

Цель исследования – на основе конкретного натурного эксперимента выявить основные факторы, формирующие различия температурных показателей в приземной зоне жилой застройки Краснодара, и определить архитектурно-планировочные приемы, позволяющие уменьшать локальный перегрев. В качестве экспериментального объекта использованы участки многоэтажной жилой застройки микрорайона Панорама; результаты сопоставлены с метеорологическим фоном дня измерений и с характеристиками различных типов подстилающей поверхности.

1. Экспериментальная фиксация температурной неоднородности приземной зоны

Исследование, выполнялось в г. Краснодаре на территории многоэтажной жилой застройки высотой 17–18 этажей, на примере бульвара в микрорайоне Панорама. Измерения проводились 17 августа 2025 г. трижды в течение дня: в 8:00, 13:00 и 18:00. Для фиксации термического состояния применялись тепловизор Testo 885 и термогигрометр RGK TH-20 [1]. Таким образом, эксперимент позволяет рассматривать не отдельное значение температуры, а изменение температурного состояния приземной зоны в течение суток.

Фоновая погода в этот день подтверждает наличие выраженной летней тепловой нагрузки. По данным страницы Яндекс Погоды для Краснодара на 17 августа, температура воздуха составляла около +23 °C утром, +31 °C днем и +29 °C вечером; в течение суток отмечались северо-восточный и восточный ветры [3]. Эти значения следует рассматривать как фоновые: локальные температуры поверхностей и условия непосредственно у фасадов могут существенно отличаться от показателей воздуха.

Особенно показательны различия между восточным и западным фасадами. В 8:00 термический нагрев восточного фасада превышал нагрев западного на 17,2 °C; в 13:00 разница составляла 6,4 °C, а в 18:00, напротив, западный фасад был нагрет сильнее восточного на 15,1 °C [1]. Следовательно, направление максимального нагрева закономерно меняется в течение суток: утренняя тепловая нагрузка смещена к восточной стороне, а вечерняя – к западной. Для приземной зоны это означает, что одинаковые по назначению участки могут находиться в существенно разных условиях в зависимости от их положения относительно фасада.

В серии измерений дополнительно фиксировалась температура в точках, расположенных в непосредственной близости от фасадов и в озелененной зоне. В 8:00 температура в озелененном участке составляла 25,9 °C, тогда как на расстоянии 1 м от восточного фасада фиксировалось 30,4 °C, а около западного фасада – 26,8 °C. Тем самым уже на локальном участке различие достигало 4,5 °C между наиболее нагретой и наиболее прохладной из рассмотренных точек. Полученный результат подтверждает необходимость оценивать не только температуру воздуха по метеорологическим данным, но и локальное температурное состояние среды непосредственно в зоне нахождения человека.

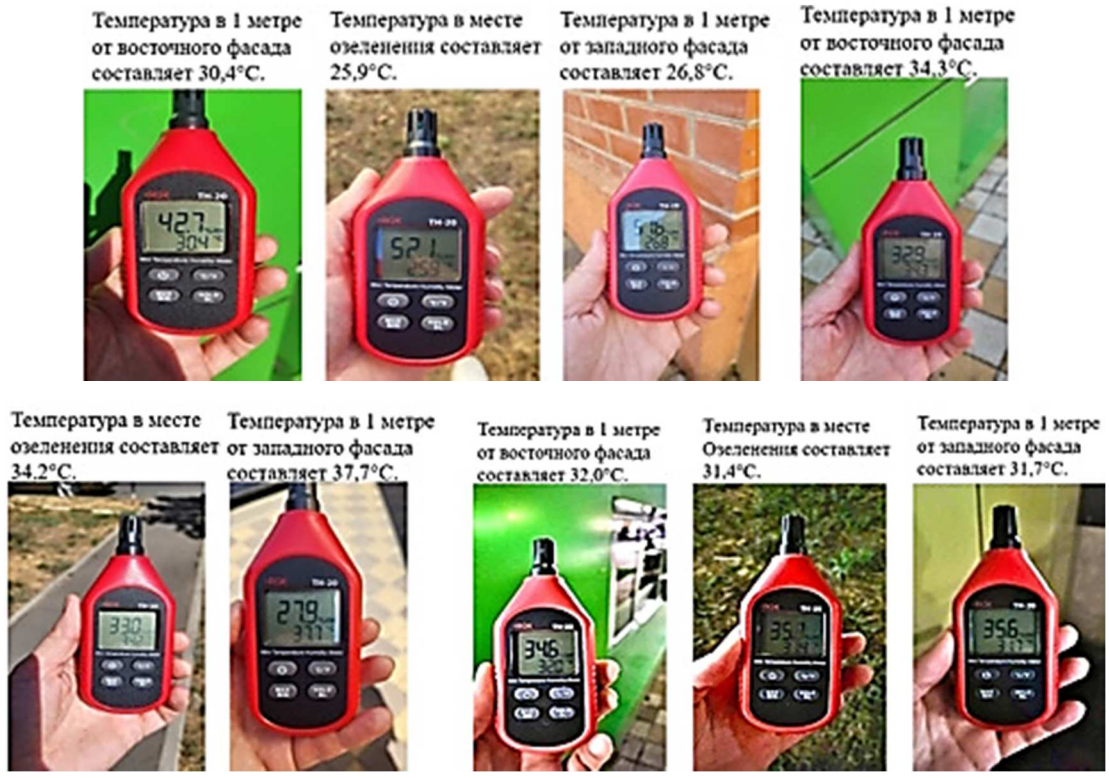


Рисунок 1 – Фотофиксация температурных показателей вблизи фасадов и в озелененной зоне

Таким образом, основной результат эксперимента состоит в установлении выраженной пространственно-временной неоднородности теплового режима. Разница до 15–17 °С между противоположно ориентированными фасадами, зафиксированная в разные часы [1], показывает, что архитектурно-планировочная организация непосредственно участвует в формировании температурной среды приземной зоны.

2. Основные факторы формирования температурных показателей

Экспериментальные данные позволяют перейти от фиксации температурной неоднородности к определению факторов, которыми она формируется. В первую очередь следует учитывать следующие взаимосвязанные характеристики: ориентацию фасадов и участков территории; продолжительность и интенсивность солнечного воздействия; цвет и фактуру фасадных и горизонтальных покрытий; теплофизические свойства материалов; коэффициент альбедо; расстояние между зданиями и их высоту; затенение; площадь и структуру озеленения; характер покрытия и функциональное назначение участка.

Ориентация является одним из наиболее очевидных факторов. Утром первоочередной радиационной нагрузке подвергаются восточные поверхности, а во второй половине дня – западные. Именно эта закономерность подтверждена данными микрорайона Панорама: максимальная разница между восточным и западным фасадами зафиксирована в 8:00 и 18:00 [1]. Поэтому при проектировании необходимо рассматривать не только суммарную инсоляцию территории, но и ее распределение по часам суток.

Материал, цвет и фактура поверхности определяют долю поглощаемой и отражаемой солнечной энергии. Существенную роль здесь играет альбедо – доля падающей солнечной радиации, отражаемая поверхностью. Для типичных городских покрытий приводятся следующие ориентировочные диапазоны: асфальт – около 0,05–0,20; бетон – 0,10–0,35; тротуарные покрытия – примерно 0,07–0,35; травяной покров – около 0,25–0,30 [4]. Для асфальтобетона значение альбедо зависит также от состояния поверхности: у нового покрытия оно может быть ниже, а по мере эксплуатации увеличивается вследствие старения и изменения поверхностного слоя [5]. Поэтому при выборе покрытий важен не только материал как таковой, но и его цвет, фактура, состояние и степень загрязнения.

Затенение изменяет радиационную нагрузку на фасад и подстилающую поверхность. Высота зданий, расстояние между корпусами, выступающие элементы, навесы и перголы формируют зоны, которые в разные часы переходят из открытого состояния в затененное. Для зоны нахождения человека это особенно важно на детских и рекреационных площадках, пешеходных маршрутах и участках длительного пребывания.

Озеленение воздействует сразу по нескольким направлениям: крона уменьшает поступление прямой солнечной радиации, а испарение и транспирация расходуют часть тепловой энергии. Поэтому наиболее эффективным является не механическое увеличение площади газонов, а целевое размещение деревьев и кустарников рядом с участками, испытывающими наибольшую радиационную нагрузку [6].

Наконец, пространственная конфигурация застройки определяет сочетание перечисленных факторов. При одинаковом материале покрытия температура может различаться из-за времени инсоляции, отражения от фасадов, положения относительно здания и соседних поверхностей. Исследования влияния планировочных решений на локальный климат также показывают значимость пространственной организации жилой застройки [7].

3. Разделение участков жилой территории по потенциальной степени термического нагрева.

Для практической оценки жилой территории целесообразно выделять участки по сочетанию типа покрытия, степени солнечного воздействия, затенения и озеленения. Такая классификация не заменяет инструментальные измерения, но позволяет определить зоны первоочередного внимания и связать их с архитектурно-планировочными решениями.

Таблица 1 – Классификация участков приземной территории по потенциальной степени термического нагрева

Категория	Основные участки	Потенциальная степень нагрева	Ориентировочное альбедо	Основной фактор
1	2	3	4	5
I	Газоны, затененные озелененные участки	Низкая	0,25–0,30 (газон)	Испарение и затенение
II	Озелененные участки с частичным солнечным воздействием	Низкая–умеренная	0,25–0,30 (газон); зависит от покрытия	Сочетание тени и радиации
III	Пешеходные покрытия и площадки в частичной тени	Умеренная	≈0,07–0,35 (плитка/бетон)	Материал, цвет, инсоляция

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
IV	Открытые площадки с твердым покрытием	Повышенная	≈0,10–0,35 (бетон); ниже у темных покрытий	Продолжительное солнечное воздействие
V	Открытые автомобильные проезды и стоянки	Высокая	≈0,05–0,20 (асфальт)	Темное покрытие и длительная инсоляция

Приведенные значения альбедо являются ориентировочными диапазонами, а не результатами измерений на конкретном объекте. Фактическое значение зависит от цвета, шероховатости, влажности, состояния и возраста материала [4, 5]. Поэтому при обследовании конкретной жилой территории предпочтительно определять характеристики фактических покрытий непосредственно на объекте.

4. Архитектурно-планировочные приемы формирования благоприятной приземной среды.

С учетом результатов эксперимента основные приемы следует связывать непосредственно с выявленными факторами теплового воздействия.

1. Ориентация и затенение. При организации жилой территории необходимо учитывать суточное перемещение зоны максимального нагрева. Восточные фасады и прилегающие участки требуют защиты в утренний период, западные – во второй половине дня. Наиболее чувствительные зоны целесообразно обеспечивать деревьями с развитой кроной, навесами и перголами.

2. Выбор материалов и цвета. Для покрытий, непосредственно окружающих места пребывания людей, следует отдавать предпочтение материалам с более высоким альбедо и ограничивать применение больших площадей темных покрытий. Выбор должен выполняться с учетом цвета, фактуры, эксплуатационного состояния и возможности создания бликов.

3. Формирование непрерывного озеленения. Деревья и кустарниковые группы следует размещать не только по периферии территории, но и вдоль пешеходных маршрутов, у детских и рекреационных площадок, возле наиболее нагреваемых фасадов.

4. Сокращение избыточной площади твердого покрытия. Крупные участки асфальта и других твердых покрытий следует фрагментировать озелененными зонами и использовать водопроницаемые решения там, где это допустимо по функциональному назначению.

5. Учет расстояний и взаимного положения зданий. При проектировании необходимо оценивать взаимное затенение корпусов и продолжительность прямого солнечного воздействия на приземные участки. Расстояние между зданиями и их высота должны рассматриваться совместно с ориентацией фасадов и размещением растительности.

Таким образом, архитектурно-планировочные решения должны формировать не просто максимально озелененную территорию, а систему пространственно распределенных зон прохлады, в которой расположение материалов, фасадов, деревьев и элементов затенения согласовано с суточной динамикой солнечного воздействия. Такой подход позволяет целенаправленно снижать тепловую нагрузку именно в зоне нахождения человека.

Заключение

Экспериментальные натурные исследования в многоэтажной жилой застройке микрорайона Панорама в Краснодаре показали выраженную пространственно-временную неоднородность термического нагрева: разница между восточным и западным фасадами составляла 17,2 °С утром, 6,4 °С днем и 15,1 °С вечером [1]. Дополнительная фиксация в приземной зоне также показала различия температур вблизи фасадов и в озелененном участке.

Формирование этих различий связано с комплексом архитектурно-планировочных и физических факторов: ориентацией, продолжительностью инсоляции, материалом, цветом и фактурой поверхности, альбедо, взаимным положением зданий, затенением и озеленением. Следовательно, при проектировании жилой застройки необходимо оценивать не только общие климатические показатели, но и локальную приземную температурную среду.

Практически значимыми являются ориентация и затенение наиболее нагреваемых участков, применение покрытий с благоприятными отражательными характеристиками, целевое размещение древесной растительности и сокращение избыточного твердого покрытия. Перечисленные приемы позволяют формировать более благоприятные температурные и микроклиматические условия в непосредственной зоне нахождения человека.

Литература

1. Сокольская О.Н. Градо-экологическое проектирование застройки г. Краснодара с учётом термического нагрева деятельной поверхности / О.Н. Сокольская, А.И. Гиясов // [наимено-

вание издания в исходном документе]. – 2025. – 7 с. Материал, предоставленный автору исследования.
2. СП 131.13330.2025. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М. : Минстрой России, 2025.
3. Яндекс Погода. Погода в Краснодаре на 17 августа 2025 года. – URL : https://yandex.ru/pogoda/ru/krasnodar/date/august/17 (дата обращения 04.09.2026).
4. Ким Д.А. Влияние городского острова тепла на микроклимат урбанизированного пространства // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 12. – EDN SWZJLO
5. Сокольская О.Н. Влияние термического нагрева подстилающей поверхности городской застройки на экологию приземного слоя атмосферы Краснодара / О.Н. Сокольская, А.Е. Жидкова, Х.И. Аваадех // Урбанистика. – 2025. – № 3. – С. 43–54. – DOI: 10.7256/2310-8673.2025.3.74434. – EDN RAGRLA
6. Попова И.В. Оценка роли зеленых насаждений в формировании комфортных микроклиматических условий в летний период / И.В. Попова, Е.Э. Бурак, Ю.А. Воробьева // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2019. – № 2. – С. 47–55.
7. Блил де Соуза К. Влияние планировочных решений на локальный климат жилой застройки Краснодарского края и Приморского края / К. Блил де Соуза, Ф.Ф. Файзуллаев, И.В. Дуничкин // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2019. – Т. 14. – № 8. – С. 954–966.
8. Крашенинников И.А. Объемно-планировочные параметры застройки и благоприятные условия внешней среды // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – № 3 (44). – С. 262–275.
9. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений : актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*. – М. : Минстрой России, 2016.

References

1. Sokolskaya O.N. Urban-ecological design of the development of the city of Krasnodar, taking into account the thermal heating of the active surface / O.N. Sokolskaya, A.I. Giyasov // [name of the publication in the source document]. – 2025. – 7 p. Material provided to the author of the study.
2. SP 131.13330.2025. Building climatology. Updated version of SNiP 23-01-99*. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2025.
3. Yandex Weather. Weather in Krasnodar for August 17, 2025. – URL : https://yandex.ru/pogoda/ru/krasnodar/date/august/17 (date of application 04.09.2026).
4. Kim D.A. The impact of the urban heat island on the microclimate of urbanized space // Engineering Bulletin of the Don. – 2021. – № 12. EDN SWZJLO
5. Sokolskaya O.N. The Impact of Thermal Heating of the Underlying Surface of Urban Development on the Ecology of the Surface Layer of the Atmosphere in Krasnodar / O.N. Sokolskaya, A.E. Zhidkova, Kh.I. Avaadekh // Urbanistics. – 2025. – № 3. – P. 43–54. DOI: 10.7256/2310-8673.2025.3.74434 EDN RAGRLA
6. Popova I.V. Assessment of the role of green spaces in creating comfortable microclimatic conditions during the summer period / I.V. Popova, E.E. Burak, Yu.A. Vorobyova // Vestnik of the Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences. – 2019. – № 2. – P. 47–55.
7. Blil de Souza C. The impact of planning solutions on the local climate of residential development in the Krasnodar Territory and Primorsky Territory / C. Blil de Souza, F.F. Fayzullaev, I.V. Dunichkin // Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 14. – № 8. – P. 954–966.
8. Krasheninnikov I.A. Space-planning parameters of development and favorable environmental conditions // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – № 3(44). – P. 262–275.
9. SP 42.13330.2016. Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements: updated version of SNIP 2.07.01-89*. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2016.

УДК 711.4

ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ И РЕСПУБЛИКИ АДЫГЕИ С УЧЕТОМ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

♦♦♦♦♦

URBAN PLANNING LANDSCAPE-CLIMATIC ZONING OF KRASNODAR KRAI AND THE REPUBLIC OF ADYGEA

Сокольская Оксана Николаевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
ons33@mail.ru

Дроздов Виктор Станиславович
студент,
Кубанский государственный технологический университет
drozdovviktors@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается градостроительное районирование Краснодарского края и Республики Адыгея с учетом природно-климатических факторов окружающей среды, напрямую влияющих на выбор градостроительных и архитектурно-планировочных приемов застройки. Разработанное районирование способствует обеспечению комфортной и безопасной среды проживания, энергоэффективности и экологического благополучия региона. Подход акцентирует внимание на дифференциации территории по таким природно-климатическим факторам, как рельеф, температурный режим, солнечная радиация, ветровой и влажностный режимы. Это открывает возможность для оптимизации территориального планирования, учета основных природно-климатических факторов в привязке к конкретной территории застройки и исключает глобальные градостроительные, объемно-планировочные ошибки при застройке.

Ключевые слова: градостроительное районирование, ландшафтно-климатическое районирование, рельеф, температурный режим, солнечная радиация, ветровой режим и влажностный режим, Краснодарский край и Республика Адыгея.

Sokolskaya Oksana Nikolayevna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State University of Technology
ons33@mail.ru

Drozdov Viktor Stanislavovich
Student,
Kuban State University of Technology
drozdovviktors@yandex.ru

Annotation. This article examines the urban zoning of the Krasnodar Territory and the Republic of Adygea, taking into account the natural and climatic environmental factors that directly influence the choice of urban planning and architectural layout techniques. The developed zoning helps ensure a comfortable and safe living environment, energy efficiency, and the ecological well-being of the region. The approach focuses on differentiating the territory based on such natural and climatic factors as terrain, temperature regime, solar radiation, wind regime, and humidity regime. This opens up the possibility of optimizing territorial planning, taking into account the main natural and climatic factors in relation to a specific development area, and eliminates global urban planning and spatial-layout errors in development.

Keywords: urban planning zoning, landscape-climatic zoning, terrain, temperature regime, solar radiation, wind regime and humidity regime, Krasnodar Krai and the Republic of Adygea.

Основной целью данной работы является создание научно-методических основ для формирования оптимального районирования территории Краснодарского края и Республики Адыгеи по климатическим параметрам с учетом особенностей ландшафта территории.

Актуальность данной работы заключается в отсутствии единого градостроительного подхода к планированию и проектированию застройки на территории Краснодарского края и Республики Адыгеи основанного на комплексном анализе климатических и ландшафтных особенностей в привязке к местности.

Существующие градостроительные исследования отличаются крупным масштабом обобщения без привязки к территории Краснодарского края, не учитывают локальные орографические и прибрежные эффекты, а также внутри климатические контрасты, выявленные по данным современных метеонаблюдений и нормативных пересчётов. В связи с этим, обосновывается необходимость разработки новых карт градостроительного районирования территории края, основанных на детальном анализе ландшафтных и климатических особенностей в масштабе Краснодарского края и Республики Адыгея [1, 3, 14].

В качестве методов составления карт районирования, в данной работе, присутствует анализ уже существующей методики физико-географического районирования, а также сбор и анализ климатических данных и параметров рельефа Краснодарского края и Республики Адыгеи [5, 6, 7, 8].

Градостроительное районирование территории Краснодарского края и Республики Адыгеи с учетом особенностей рельефа и других климатических факторов предусматривает 8 районов:

I – Черноморское побережье;
II – Таманский полуостров;
III – Прибрежная зона Азовского моря;
IV – Кубанская равнина;
V – Предгорная зона;
VI – Горная зона;
VII – Склоновая зона;
VIII – Высокогорная зона.

На территории Черноморского побережья следует выделить четыре подрайона:

IА – Юго-восточный район Черноморского побережья Краснодарского края от Сочи до Туапсе;

IБ – Район Туапсе-Геленджик;
IВ – Район Геленджик-Новороссийск;
IГ – Район Новороссийск-Анапа.

Также для Прибрежной зоны Азовского моря следует выделить два подрайона:

IIIА – Южная часть побережья;
IIIБ – Северная часть побережья.

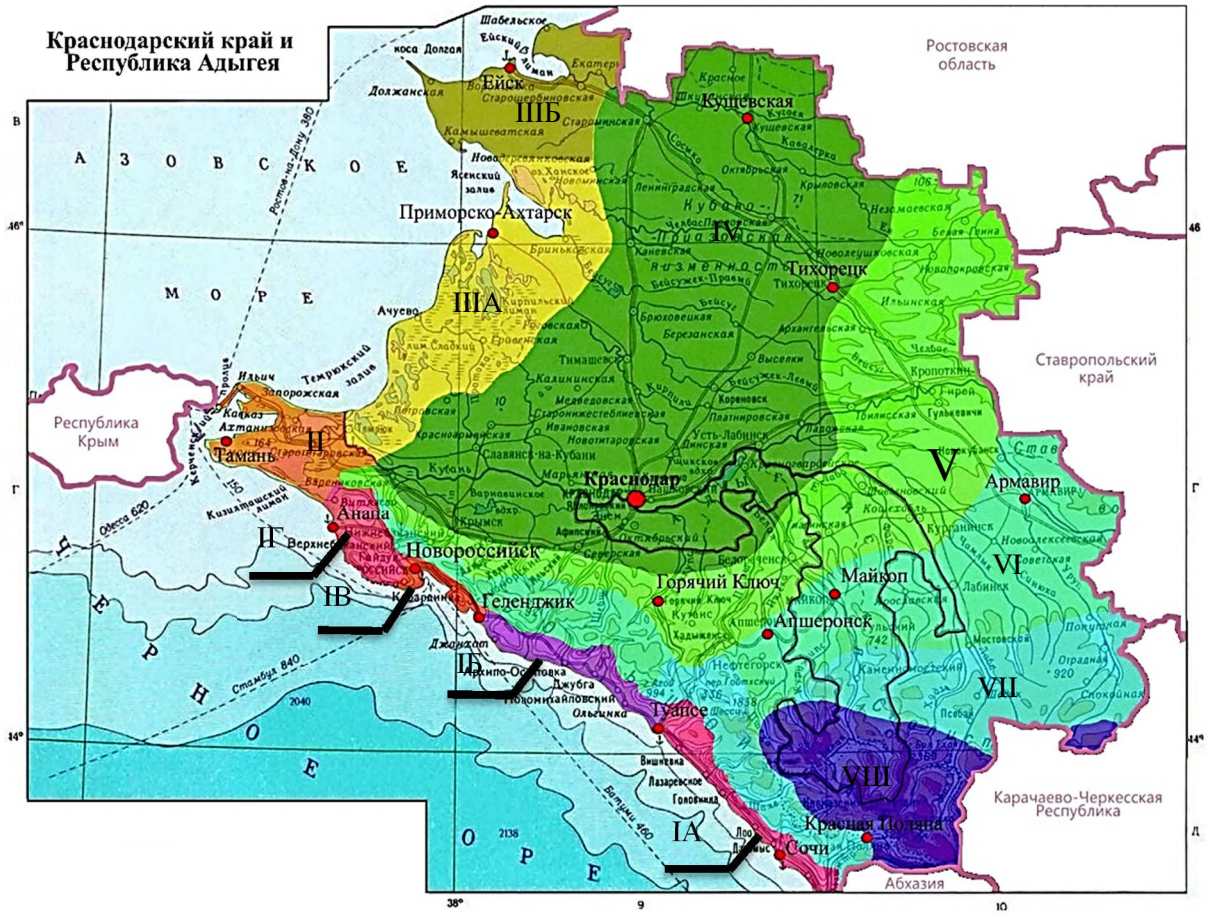


Рисунок 1 – Градостроительное ландшафтно-климатическое районирование Краснодарского края и Республики Адыгея

Предложенное градостроительное районирование с делением на VIII районов основано на тщательном анализе природно-климатических факторов Краснодарского края и Республики Адыгея, таких как рельеф, температурный режим, солнечная радиация, ветровой режим, а также режим влажности и осадков, что позволяет создать методику градостроительного и архитектурно-планировочного проектирования застройки для каждой зоны с учетом местных условий, с целью формирования биоклиматической застройки.

Район I – Черноморское побережье отличается крайне благоприятными природно-климатическими характеристиками окружающей среды и обладает возможностью развития высококлассной инфраструктуры для туристической отрасли круглогодичного использования.

В целом градостроительные и архитектурно-планировочные предпосылки к застройке вдоль линии Черноморского побережья от границы с Абхазией до Таманского полуострова сводятся к комплексному учету ряда природно-климатических факторов:

– высокой солнечной радиации (1380–1400 кВт·ч/м²);

– сезонных бризовых ветров (до 5 м/сек);

– особенному рельефу, представляющему собой узкую полоску между морем и крутыми склонами, иногда подходящими вплотную к линии воды;

– особенностей гидрологической системы с множеством больших и малых рек, впадающих в море;

– крайне неоднородным влажностным режимом.

При этом **подрайон IA – Юго-восточный район Черноморского побережья (Сочи – Туапсе)** характеризуется сочетанием узкой прибрежной полосы и крутых горных склонов Кавказского хребта, где абсолютные отметки изменяются от 0 до 500 м над уровнем моря на расстоянии 5–10 км от береговой линии. Отличается уникальным влажным субтропическим климатом, защищенным горами от холодных северных ветров и возможности круглогодичного использования открытых пространств.

Окружающая среда в этом районе диктует жесткие и специфические градостроительные и архитектурно-планировочные предпосылки к застройке, обусловленные максимально повышенной влажностью, экстремальными ливнями и горным рельефом. Рекомендуется устройство дренажных систем, усиленной ливневой канализации с повышенной пропускной способностью, проектирование кровель с усиленным уклоном, а также использование вентилируемых фасадов.

Подрайон IБ – Район Туапсе – Геленджик представляет собой прибрежную полосу шириной 2–5 км с резким переходом к горным хребтам высотой до 700 м, где характерны узкие речные долины и крутые склоны. Особенность района заключается в переходном характере климата, усилении ветровой активности.

Ведущие градостроительные и архитектурно-планировочные предпосылки основаны на защите от агрессивного солнца и учете сложного рельефа с наложением ветровых бризовых потоков.

Подрайон IВ – Район Геленджик – Новороссийск. Ключевой особенностью района является действие новороссийской боры, экстремально сильного северо-восточного ветра в холодный период года. При боре скорость ветра превышает 20 м/с, в отдельных случаях на перевалах достигая 40–60 м/с [2]. В итоге, главной градостроительной и архитектурно-планировочной задачей в городах, расположенных в данной зоне, является аэродинамическая адаптация застройки в зимний период при обеспечении глубокой солнцезащиты от агрессивного летнего зноя.

Подрайон IГ – Новороссийск – Анапа представляет собой пологоволнистую прибрежную равнину с отдельными возвышенностями до 150 м и шириной прибрежной зоны 10–15 км. Климат в этой зоне классифицируется как сухой субтропический с максимальной солнечной радиацией до 1400вт/м^2. Комплекс этих факторов ставят ряд задач градостроительного и архитектурно-планировочного характера по формированию открытой, аэрируемой бризовыми ветрами структуры застройки, адаптированной к сухому климату с защитными характеристиками застройки от сильных восточных ветров с Кубанской равнины.

Район II – Таманский полуостров представляет собой низменную равнину, где характерны грязевые вулканы, лиманы и песчаные косы, а береговая линия сильно изрезана. Рассматривается как ключевой регион для развития туристическо-рекреационной застройки и развитием винного туризма. Ведущим климатическим показателем для целей планировки и застройки является максимальный показатель солнечной радиации до 1400вт/м^2 и наличие двух морей.

Также, преобладают восточные и северо-восточные ветры со стороны Кубанской равнины, а открытость территории с трех сторон (Азовское и Черное моря) создает условия для интенсивного ветропереноса, что обуславливает расчетное ветровое давление 0,67 кПа (67 кгс/м²) [3]. Особенность градостроительных и архитектурно-планировочных задач района заключается в развитии благоприятных бризовых ветров и необходимости ветрозащитных мероприятий при градостроительном и архитектурно-планировочном проектировании со стороны Кубанской равнины.

Район III – Прибрежная зона Азовского моря (входят IIIA и IIIБ).

Побережье Азовского моря от Таманского полуострова и до границы с Ростовской областью предлагается под развитие туристической отрасли в стране. Здесь расположены довольно крупные города Ейск и Приморско-Ахтарск. В целом территория побережья предлагается под

развитие туристическо-рекреационной застройки, курортов семейного и бальнеологического характера с упором на экологию.

Архитектурно-планировочные приемы определяются формированием застройки с учетом развития бризовых ветров и защиты от степных ветров с востока, а также близостью моря и лиманов.

Подрайон IIIA – Южная часть побережья (лиманы от Таманского п-ова до ст. Камышеватской) представляет собой низменную равнину с абсолютными отметками 0–25 м, где широко представлены лиманы, плавни и заболоченные территории, создающие специфический микроклимат. Именно эти природно-климатические особенности способствовали выделению района в отдельную зону с точки зрения градостроительства и планировки застройки.

Архитектурно-планировочные предпосылки к застройке определяются мелководностью акватории и наличием лиманов, позволяющие сочетать семейный отдых с лечебным и экстремальным спортом.

На заболоченных территориях с лиманами и плавнями обязательным является инженерная защита в виде комплексной мелиорации и устройства дренажных систем перед началом строительства, при этом здания приподнимаются на свайных фундаментах или искусственных террасах, чтобы избежать подтоплений.

Район IV – Кубанская равнина представляет собой обширную равнину с абсолютными отметками 0–100 м и слабым уклоном с юго-востока на северо-запад, с развитой речной сетью и наличием мощного агропромышленного потенциала.

Климат Кубанской равнины классифицируется как умеренно-континентальный с мягкой зимой и жарким, продолжительным летом. Территория Кубанской равнины отличается расположением на территории наиболее крупного города края, Краснодара, и нескольких городских административных центров, таких как город Тихорецк и станица Кущевская.

В целом градостроительные и архитектурно-планировочные предпосылки к застройке сводятся к комплексному учету высокой солнечной радиации (1300–1350 кВт·ч/м^2), что влечет за собой устройство летних помещений, учет ориентации зданий по сторонам света для контроля по перегреву помещений, применению различных солнцезащитных мероприятий в городской среде и введение принципов «зеленой архитектуры».

Рекомендуется застройка и многоярусный тип озеленения, базирующиеся на строгой защите от преобладающих степных суховеев с восточной стороны, приносящих пыль в города.

Также инженерно-градостроительные предпосылки к застройке на территории Кубанской равнины сводятся к созданию мощных систем ливневой канализации на территории застройки, инженерной защиты от подтоплений и созданию водоохранных зон, что продиктовано наличием развитой сети рек.

Горы влияют на климат, как большими колебаниями высотных отметок, так и сложным рельефом, обусловливая исключительное многообразие и пестроту климатических условий. Здесь что ни склон или долина, – то своеобразный климат. Все это затрудняет проблему районирования в горной части Краснодарского края и Республики Адыгея. Климатические различия, наблюдаемые в равнинных условиях на расстоянии сотен или даже тысяч километров, в горах проявляются через километры или, в крайнем случае, десятки километров.

В условиях Краснодарского края и Республики Адыгея для целей градостроительства и планировки застройки выделены **V – Предгорный (100–200 м над ур.м.), VI – Горный (200–500 м над ур.м.), VII – Склоновый (500–1000 м над ур.м.), VIII – Высокогорный (1000–3000 м над ур.м.) район.**

В целом градостроительные и архитектурно-планировочные предпосылки к застройке определяются переходным характером рельефа, что формирует террасную структуру застройки и каскадное расположение вдоль горизонталей. Присутствует запрет на подрезку склонов без их инженерного закрепления.

При размещении застройки на склонах климатические особенности склоновой территории определяют строгий учет ориентации склонов по сторонам света и вынос жилой застройки на южную сторону при организации солнцезащитных мероприятий в летний период.

Особое внимание следует уделять отводу ливневых вод, через закрытую сеть лотков, во избежание размыва грунта и опасности селей.

Высокая сейсмичность отражается в обязательном использовании монолитного железобетонного каркаса, фундаментов глубокого заложения и антисейсмических швов.

Рассматриваемые предгорные и горные территории пронизаны сетью различных рек, больших и малых размеров, что необходимо учитывать при градостроительном освоении территории и формировать застройку с учетом водоохранных зон, а также зон подтоплений.

При более детальном рассмотрении каждой горной зоны отдельно стоит выделить, что **V – Предгорный район (100–200 м над ур.м.)** характеризуется пологоволнистым рельефом с

отдельными возвышенностями и речными долинами, а район **VI – Горный (200–500 м над ур.м.)**. представляет собой среднегорный рельеф с глубокими речными долинами и крутыми склонами. Особенность района заключается в сложном рельефе, требующем террасирования при строительстве, и повышенной сейсмичности до 7–8 баллов.

Особенность этих двух районов заключается в переходном характере от равнины к горам с крутыми склонами. Именно в этих двух зонах расположены такие большие города как Майкоп, Армавир, Апшеронск, Горячий ключ.

В этих условиях при формировании застройки необходимо учитывать горно-долинную циркуляцию воздуха и зоны застоя, а также обязательно исключить расположение застройки в низменностях.

Район VII – Склоновая зона (500–1000 м над ур.м.) характеризуется крутосклонным среднегорным рельефом риском схода лавин и селей, а также район **VIII – Высокогорная зона (1000–3000 м над ур.м.)** представляет собой альпийский высокогорный рельеф, где характерны ледники, вечная мерзлота на отдельных плато.

На территориях рассматриваемых зон категорически запрещается строительство без предварительной оценки рисков и разработки комплексных мероприятий по инженерной защите. В целом архитектурно-планировочные предпосылки необходимо реализовать в формировании рекреационно-туристических комплексов для семейного и спортивного отдыха, представляющих собой низко этажную застройку, интегрированную в ландшафт.

Предложенное градостроительное ландшафтно-климатическое районирование с делением на VIII районов позволяет создать методику градостроительного и архитектурно-планировочного проектирования застройки для каждой зоны индивидуально, с целью формирования биоклиматической среды обитания среди застройки с учетом локальных нагрузок.

Литература

1. СП 131.13330.2025. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.
3. СНКК 20-303-2002. Нагрузки и воздействия. Ветровая и снеговая нагрузки. Территориальные строительные нормы Краснодарского края.
4. ГОСТ Р 55912-2020. Климатология строительная. Номенклатура показателей наружного воздуха.
5. Умнякова Н.П. Строительная климатология: новые климатические параметры / Н.П. Умнякова, М.В. Клюева // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2023. – № 1. – С. 45–52.
6. Мягков М.С. Архитектурная климатография / М.С. Мягков, Л.И. Алексеева. – М. : Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2016. – 363 с. ISBN 978-5-16-011855-0. – EDN YHYUKT
7. Город, архитектура, человек и климат / М.С. Мягков [и др.]; Науч.-исслед. и проектно-изыскательский ин-т экологии города. – М. : Архитектура-С, 2007. – ISBN 978-5-9647-0113-2. – EDN QNMPXF
8. Региональная мелиоративная география. Краснодарский край : монография / Э.Ю. Нагалевский, Ю.Я. Нагалевский, И.Н. Папенко. – Краснодар : КубГАУ, 2013. – 280 с.
9. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции.
10. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах.
11. СП 45.13330.2017. Земляные сооружения, основания и фундаменты.
12. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии.
13. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.
14. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.
15. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Межгосударственный стандарт.
16. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. Межгосударственный стандарт.
17. СП 438.1325800.2019. Инженерные изыскания при планировке территорий.

References

1. SP 131.13330.2025. Construction Climatology. Updated version of SNiP 23-01-99*.
2. SP 20.13330.2016. Loads and Actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85*.
3. SNKK 20-303-2002. Loads and Actions. Wind and Snow Loads. Territorial Construction Norms of the Krasnodar Territory.
4. GOST R 55912-2020. Construction Climatology. Nomenclature of Outdoor Air Parameters.

5. Umnyakova N.P. Construction Climatology: New Climatic Parameters / N.P. Umnyakova, M.V. Klyueva // Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN. – 2023. – № 1. – P. 45–52.
6. Myagkov M.S. Architectural Climatography / M.S. Myagkov, L.I. Alekseeva. – M. : INFRA-M Research and Publishing Center LLC, 2016. – 363 p. ISBN 978-5-16-011855-0 EDN YHYUKT
7. City, Architecture, Human, and Climate / M.S. Myagkov [et al.]; Research and Design Institute for Urban Ecology. – M. : Arkhitektura-S, 2007. – ISBN 978-5-9647-0113-2 EDN QNMPXF
8. Regional Land Reclamation Geography: Krasnodar Krai – A Monograph / E.Yu. Nagalevsky, Yu.Ya. Nagalevsky, I.N. Papenko. – Krasnodar : KubSAU, 2013. – 280 p.
9. SP 70.13330.2012. Load-bearing and enclosing structures.
10. SP 14.13330.2018. Construction in seismic regions.
11. SP 45.13330.2017. Earthworks, bases, and foundations.
12. SP 28.13330.2017. Protection of building structures against corrosion.
13. SP 32.13330.2018. Sewerage. External networks and facilities.
14. SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings, and structures against hazardous geological processes. Basic provisions.
15. GOST 25100-2020. Soils. Classification. Interstate standard.
16. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters. Interstate standard.
17. SP 438.1325800.2019. Engineering surveys for territory planning.

УДК 699.841

РОЛЬ МАТЕРИАЛОВ И СОЕДИНЕНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПЛАСТИЧНОСТИ И ЭНЕРГОПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ: ПОДБОР СТАЛЕЙ, БЕТОНОВ, ТИПОВ УЗЛОВ

♦♦♦♦♦

THE ROLE OF MATERIALS AND CONNECTIONS IN ENSURING DUCTILITY AND ENERGY ABSORPTION UNDER SEISMIC LOADS: SELECTION OF STEELS, CONCRETES, AND TYPES OF JOINTS

Сорокина Елена Николаевна
кандидат педагогических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
karpanina.elena@yandex.ru

Маджид Абдулла Аль-Калиа
аспирант кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет

Дубиненко Никита Александрович
лаборант кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
nikita-dubinenko@yandex.com

Аннотация. Рассматривается влияние выбора материалов и типов соединений на способность конструктивной системы к диссипации сейсмической энергии. Анализируются требования к сталям (соотношение пределов текучести и прочности, ударная вязкость, хладостойкость), к бетону и армированию (ограничение класса прочности, требования к пластической работе арматуры), а также к сварным и болтовым соединениям в диссипативных зонах. Сопоставляются подходы российских норм (СП 16.13330, СП 63.13330, СП 14.13330) и зарубежных (Eurocode 8, AISC 341). Даны практические рекомендации по выбору материалов и узлов для сейсмостойких конструкций.

Ключевые слова: сейсмостойкость, пластичность, энергопоглощение, диссипативные зоны, сварные соединения, болтовые соединения, высокопластичная сталь, фибробетон, пластические шарниры.

Sorokina Elena Nikolaevna
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
karpanina.elena@yandex.ru

Majid Abdullah Al-Kalia
Postgraduate Student in the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University

Dubinenko Nikita Aleksandrovich
Laboratory Assistant at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
nikita-dubinenko@yandex.com

Annotation. The influence of the choice of materials and types of connections on the capacity of a structural system to dissipate seismic energy is considered. The requirements for steels (the ratio of yield strength to tensile strength, impact toughness, cold resistance), for concrete and reinforcement (limitation of the strength class, requirements for the plastic behavior of reinforcement), as well as for welded and bolted connections in dissipative zones are analysed. The approaches of Russian standards (SP 16.13330, SP 63.13330, SP 14.13330) and foreign standards (Eurocode 8, AISC 341) are compared. Practical recommendations are provided for selecting materials and components for earthquake resistant structures.

Keywords: seismic resistance, ductility, energy absorption, dissipative zones, welded joints, bolted joints, high ductility steel, fiber reinforced concrete, plastic hinges.

В настоящий момент тема сейсмостойкости зданий и сооружений достаточно широко освещена в научной литературе [1–5]. При этом, существуют вопросы в сфере подбора сталей, бетонов и типов узлов для конструкций в условиях сейсмики, требующие более детального рассмотрения. В рамках данной статьи представлен анализ роли материалов и соединений в обеспечении пластичности и энергопоглощения при сейсмических воздействиях с учетом сопоставления подходы российских норм (СП 14.13330, СП 16.13330, СП 63.13330 и пр.) и зарубежных норм (Eurocode 8, AISC 341 и пр.) [6, 7].

Сейсмостойкое проектирование основано на идее, что при сильном землетрясении конструкция не должна оставаться упругой – это привело бы к колоссальным сечениям и весу. Вместо этого нормы допускают локальные неупругие деформации: часть сейсмической энергии поглощается через образование пластических шарниров в специально предусмотренных зонах. Эти зоны называются диссипативными, и их способность к циклическому деформированию без потери несущей способности определяет сейсмостойкость здания в целом.

СП 14.13330.2018 реализует этот подход через коэффициент K1K1 – коэффициент допускаемых повреждений. Чем меньше K1K1, тем больше расчетная сейсмическая нагрузка, но

тем меньше требований к пластичности [8]. Для стального рамного каркаса K1 = 0,25 = 0,25, для каркаса с диафрагмами – 0,22. Это означает, что система должна быть способна к значительному неупругому перераспределению усилий.

Eurocode 8 использует коэффициент поведения qq, достигающий 6–8 для стальных рам высокого класса пластичности (DCH) [9]. ASCE 7 – коэффициент RR до 8 для Special Moment Frames. Чем выше qq или RR, тем глубже ожидаемая пластичность – и тем жестче требования к материалам и узлам.

Ключевой параметр пластичности стали – отношение предела текучести σy = σy к временному сопротивлению σu = σu. Чем оно ниже, тем больше диапазон пластических деформаций до разрушения.

СП 16.13330.2017 (п. 6.1.1) требует для стальных конструкций в сейсмических районах (при сейсмичности 8–9 баллов), чтобы отношение σy/σu = σy/σu составляло не более 0,85 [10]. Eurocode 8 (EN 1998-1, п. 6.2) устанавливает более жесткий предел: fy/fu ≤ 0,80 = fy / fu ≤ 0,80 для стали класса пластичности B и fy/fu ≤ 0,85 = fy/fu ≤ 0,85 для класса A. AISC 341 требует fy/fu ≤ 0,85 = fy /fu ≤ 0,85 и дополнительно ограничивает фактический предел текучести – не более 1,1 от номинального, чтобы избежать «сверхпрочности», которая сместит пластический шарнир в нежелательное место [11]. Сопоставление подходов российских и зарубежных норм представлено в таблице (табл. 1).

Таблица 1 – Сопоставление подходов российских и зарубежных норм в вопросах текучести и прочности стали

Параметр	СП 16.13330	Eurocode 8	AISC 341
σy/σu = σy /σu, не более	0,85	0,80 (класс B)	0,85
Ограничение фактического σy = σy	Нет	Нет	≤ 1,1·σy, nom ≤ 1,1·σy, nom
Удлинение, не менее	Не нормировано	15 % (класс B)	20 % (по ASTM)

Для сейсмостойких конструкций в российских условиях применяются стали следующих марок:

1. C245, C345 (ГОСТ 27772) – основной выбор для несущих элементов каркаса. C345 (аналог S355) обеспечивает хороший баланс прочности и пластичности, σy/σu≈0,7 = σy /σu ≈0,7 – 0,75 [12];
2. 09Г2С – для конструкций в условиях низких температур (Сибирь, Дальний Восток), ударная вязкость гарантирована до минус 70 °C;
3. 10ХСНД – для особо ответственных конструкций, высокая коррозионная стойкость.

Не рекомендуется применять высокопрочные стали (C590, C690 и выше) для диссипативных элементов: их σy/σu = σy /σu близок к 0,95, пластическое деформирование происходит в очень узком диапазоне, и хрупкое разрушение наступает быстро. Eurocode 8 прямо запрещает использование стали выше S460 для диссипативных элементов без специального обоснования [9].

Для сейсмических районов с расчетной температурой ниже минус 40 °C СП 16.13330 требует проверки ударной вязкости по ГОСТ 9454. Сейсмика подразумевает динамическое нагружение, а при низких температурах риск хрупкого разрушения резко возрастает. Поэтому для сварных узлов в таких условиях марка стали должна выбираться с запасом по вязкости: например, 09Г2С вместо обычной C345.

Российские и зарубежные нормы предъявляют определенные требования к бетону и армированию. Так, СП 14.13330.2018 (п. 6.6) ограничивает класс бетона по прочности на сжатие для сейсмических районов: не ниже B15 для монолитных конструкций и не ниже B25 для колонн. Eurocode 8 требует класс не ниже C20/25 для DCM и C25/30 для DCH. Однако верхний предел тоже важен: слишком прочный бетон (B50 и выше) более хрупок, хуже трещиностойкий и быстрее деградирует при циклическом нагружении. Для диссипативных ж/б элементов рекомендуется диапазон B25–B40.

Ключ к пластичности железобетона – арматура. В сейсмических элементах арматура характеризуется следующими параметрами:

1. Продольная арматура должна быть класса A500C и выше, с отношением σy/σu = σy /σu не более 0,90 (СП 63.13330.2018, п. 10.3.3). Eurocode 8 требует σy/σu ≤ 0,90 = σy /σu ≤ 0,90 для арматуры класса B и C;
2. Поперечная арматура (хомуты) обеспечивает сжатую зону бетона от преждевременного выкрашивания и удерживает продольную арматуру от потери устойчивости при циклическом нагружении. Шаг хомутов в потенциальных пластических зонах (на длине lcr = lcr от узла) – не более minf_0 (6dbl,150 мм) min(6 = dbl,150 мм), где dbl = dbl – диаметр продольного стержня;

3. Коэффициент объемного армирования в узлах должен обеспечивать прочность узла на сдвиг, которая часто становится критическим фактором при сейсмике.

В свою очередь, применение стальной или полимерной фибры (рис. 1) в бетоне диссипативных элементов позволяет: повысить вязкость разрушения – фибра «сшивает» трещины, предотвращая их быстрое раскрытие; улучшить циклическую прочность – гистерезисные петли остаются более полными даже после нескольких циклов; частично заменить поперечную арматуру в узлах, где ее плотное расположение затрудняет бетонирование [13]. СП 313.1325800.2018 «Конструкции фибробетонные» дает основу для расчета, но требования к сейсмическим воздействиям в нем не детализированы. Зарубежные нормы (ACI 318, Appendix D) содержат более подробные методики применения фибробетона в сейсмических зонах [14].

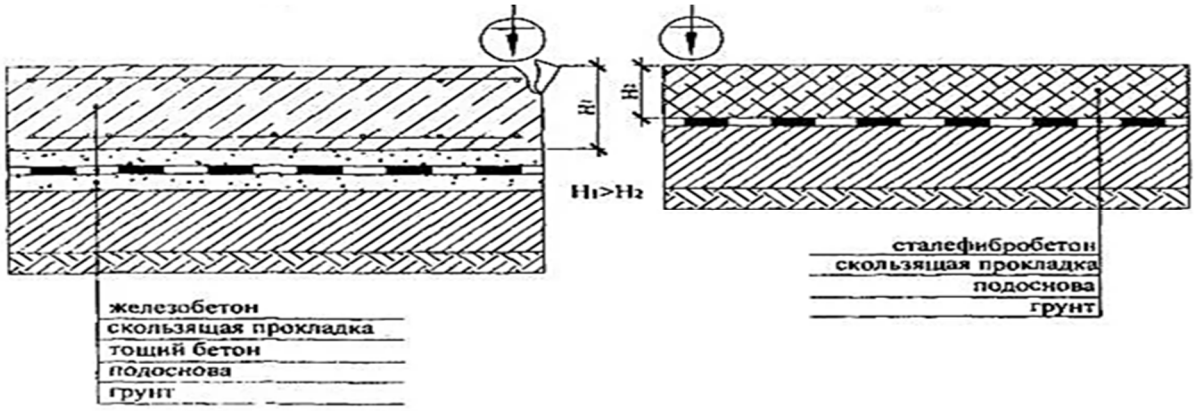


Рисунок 1 – Повышение пластичности и энергопоглощения с использованием стальной фибры и стержневой арматуры в бетоне

Сварные швы в диссипативных зонах – самое уязвимое место стальных сейсмостойких каркасов. Опыт землетрясений (Нортридж, 1994; Кобе, 1995) показал массовые хрупкие разрушения сварных узлов «ригель–колонна» в зданиях, спроектированных по действовавшим нормам. Причина этого – концентрация напряжений в зоне шва, наличие дефектов (непровары, поры), а также то, что металл шва и околошовная зона имели более низкую пластичность, чем основной металл.

В существующих нормах устанавливаются определенные требования к сварным швам в сейсмических районах. СП 16.13330.2017 (п. 14.1.6) устанавливает, что сварные соединения в сейсмических районах должны выполняться с полным проплавлением (рис. 2) [10]. Для ответственных узлов требуется контроль УЗК или рентгеном. Электроды для ручной дуговой сварки – типа Э42А, Э46А, Э50А (с индексом «А» – обеспечивающие повышенную пластичность шва).

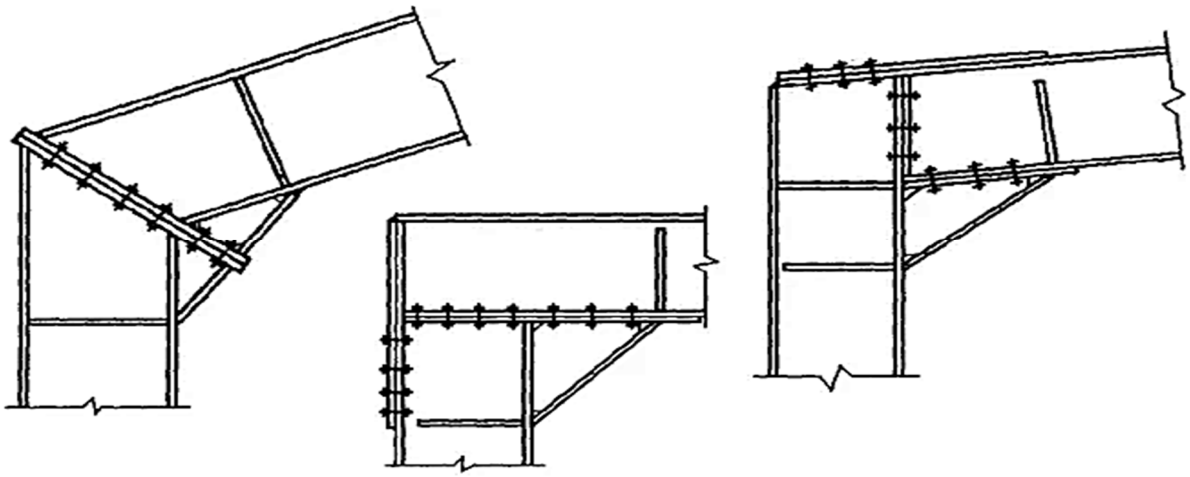


Рисунок 2 – Полное проплавление швов в зонах предполагаемых пластических деформаций

Коэффициент условий работы mкр = 1,4 *m*кр = 1,4 для стальных конструкций при сейсмике увеличивает расчетное сопротивление стали на 40 % (из-за кратковременности сейсмической нагрузки), но для сварных соединений он снижается до 1,0 – то есть швы не получают «бонуса» на кратковременность, так как их хрупкое разрушение не зависит от длительности

нагрузки. В таблице (табл. 2) представлено сравнение некоторых российских и зарубежных норм в данном вопросе.

Таблица 2 – Сопоставление подходов российских и зарубежных норм в вопросах параметров швов и соединений

Параметр	СП 16.13330	Eurocode 8	AISC 341
Тип швов в диссипативных зонах	Полное проплавление	Полное проплавление	CJP (Complete Joint Penetration)
Контроль качества	УЗК / рентген	Визуальный + выборочный УЗК	УЗК 100 % для Seismic Critical Welds
Коэффициент к расчетному сопротивлению	1,0 (без повышения)	Не повышается	Не повышается

Современный подход к сейсмостойким стальным узлам – принудительное отведение пластического шарнира (рис. 3) от сварного шва. Это достигается: ослаблением сечения ригеля (Reduced Beam Section, RBS) – участок ригеля рядом с узлом намеренно утоньшается, что заставляет пластический шарнир формироваться в ослабленной зоне, а не в сварном шве; усилением панели колонны – накладками на стенку и полки, чтобы узел был прочнее ригеля, и пластичность развивалась в ригеле; фланцевыми болтовыми соединениями с концевой пластиной, где пластический шарнир формируется в ригеле до пластины, а болты и швы остаются упругими.

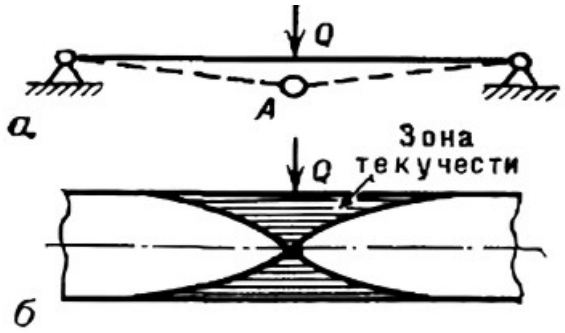


Рисунок 3 – Развитие деформации в специально спроектированной зоне пластического шарнира при сейсмическом воздействии

В российской практике эти решения описаны в «Рекомендациях по расчету металлических рамных каркасов на сейсмические воздействия» (1987 г.), но в действующих СП не нормированы детально. Применение возможно по СП 16.13330 с обоснованием расчетов [15].

С точки зрения болтовых соединений для сейсмостойких конструкций предпочтительны (рис. 4) фрикционные болтовые соединения (на высокопрочных болтах с контролируемым натяжением), т.к. они работают за счет трения между соединяемыми поверхностями и не имеют зазора, который при циклическом нагружении приводит к ударам и быстрому износу.



Рисунок 4 – Болтовые соединения в условиях сейсмостойкого проектирования

При этом срезные соединения (болты работают на срез и смятие) не рекомендуются для диссипативных зон, так как при знакопеременных нагрузках отверстия разбиваются, болты

ослабляются, и соединение теряет жесткость. Eurocode 8 прямо указывает: в диссипативных зонах болты должны быть либо фрикционного типа (Category C), либо фрикционно-срезного (Category B) с контролем предельного состояния по скольжению.

Фланцевые (торцевые) болтовые соединения ригеля с колонной – альтернатива сварным узлам в сейсмостойких рамах. Можно выделить их следующие преимущества: отсутствие сварки в зоне монтажа – нет проблем с хрупкостью шва; контролируемое натяжение болтов – предсказуемое поведение; пластический шарнир формируется в ригеле до фланца, а соединение остается упругим. Также важно упомянуть недостатки: большая толщина концевой пластины (до 30–40 мм), требуется много болтов высокого класса прочности (10.9), что увеличивает стоимость узла. Однако надежность при сейсмике компенсирует затраты.

В условиях сейсмических воздействий на узлы ж/б каркаса, возникают определенные проблемы сдвига в узле. Сейсмическая нагрузка создает в стыках ригелей с колоннами большие сдвигающие усилия: моменты с обеих сторон узла передаются через сжатую диагональ бетона и растянутую арматуру. Если поперечное армирование узла недостаточно, бетон выкрашивается, и узел теряет несущимость.

СП 63.13330.2018 (п. 10.4) требует расчета узлов на сдвиг с учетом наклонных трещин. Eurocode 8 дополнительно требует : проверку узла по предельному сжатому напряжению бетона (не более 0,5·fcd0,5·fcd для DCH); обязательную поперечную арматуру в узле в виде замкнутых хомутов с шагом не более minf0 (6dbl,100 мм)min (6dbl,100 мм); анкеровку продольной арматуры ригеля в узле на длину lb ≥ 10dbllb ≥ 10dbl с крюками или петлями [16].

Косвенное армирование узла – сетки, спирали, поперечная арматура – работает как обойма, повышая прочность и деформативность бетона в условиях сжатия. Объемный коэффициент армирования μsμs в потенциальных пластических зонах должен быть не менее 0,008 для DCM и 0,012 для DCH по Eurocode 8. В СП 63.13330 аналогичные требования задаются через расчетные формулы, но без явной привязки к классу пластичности.

Таким образом, для отечественных и зарубежных норм можно составить следующее итоговое сопоставление между подходами в условиях сейсмических воздействий (табл. 3) [17]:

Таблица 3 – Итоговое сопоставление между подходами российских и зарубежных норм

Параметр	СП 16.13330 / СП 63.13330	Eurocode 8 / EN 1998-1	AISC 341 / ACI 318
σy/σuσy/σu для стали	0,85	0,80 (DCH)	0,85
Ограничение фактического σyσy	Нет	Нет	≤1,1·σy,nom≤1,1·σy,nom
Класс бетона (мин.)	B15 (B25 для колонн)	C25/30 (DCH)	C25 (4000 psi)
Тип швов в диссипативных зонах	Полное проплавление	Полное проплавление	CJP + сейсмический сварочный протокол
Болты в диссипативных зонах	Фрикционные	Cat. B или C	A325/A490, SLIP-CRITICAL
Контроль сварки	УЗК / рентген	Выборочный УЗК	100 % УЗК для Seismic Critical Welds
Косвенное армирование узлов	По расчету	μs ≥ 0,008μs ≥ 0,008	По расчету + конструктивные

Можно сделать следующие выводы:

1. Сталь для диссипативных элементов должна иметь σy/σu ≤ 0,85σy / σu ≤ 0,85, хорошую ударную вязкость и гарантированное удлинение. Применение высокопрочных сталей (выше C460/S460) в пластических зонах недопустимо без специального обоснования.

2. Бетон должен быть в диапазоне B25–B40 – достаточно прочный для восприятия сжатия, но не слишком хрупкий. Фибробетон в узлах повышает циклическую стойкость и может заменить часть поперечной арматуры.

3. Сварные соединения в диссипативных зонах должны выполняться с полным проплавлением и 100 %-м контролем. Пластический шарнир следует отводить от шва конструктивными мерами (RBS, усиление панели колонны, фланцевые соединения).

4. Болтовые соединения в диссипативных зонах – фрикционные или фланцевые. Срезные соединения не рекомендуются.

5. Ж/б узлы требуют плотного поперечного армирования (шаг хомутов не более 6dbl6*dbl* или 100 мм), расчета на сдвиг и анкеровки продольной арматуры с крюками.

По результатам исследования установлено, что российские нормы дают общие требования к материалам и узлам в сейсмических районах, но уступают зарубежным в детализации: отсутствие ограничения фактического предела текучести, отсутствие нормирования RBS, менее жесткий контроль сварки. Для уникальных и ответственных объектов эти пробелы следует восполнять через специальные технические условия (СТУ).

Литература

1. Сорокина Е.Н. Применение BIM-технологий для интеграции расчетов сейсмостойкости и оценки надежности стальных конструкций на стадии проектирования / Е.Н. Сорокина, В.П. Гончаровская, В.Р. Иванчук // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр – МКРНП): Сборник материалов XXXXII Международной научно-практической конференции, Москва, 16 декабря 2025 года. – М. : «АНО ДПО «Университет ИТБО», 2025. – С. 114–119.
2. Зыбин И.К. Применение демпферов для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений / И.К. Зыбин, А.О. Попов, Е.Н. Сорокина // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2022. – № 4. – С. 123–128.
3. Paulay T. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings / T. Paulay, M.J.N. Priestley. – New-York : Wiley, 1992. – 744 p.
4. Сорокина Е.Н. К проблеме обеспечения сейсмостойкости высотных зданий и сооружений / Е.Н. Сорокина, А.А. Шакиров, А.А. Шкодин // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 3. – С. 76–78.
5. Сорокина Е.Н. Сейсмостойкость низковольтных комплексных устройств (НКУ) / Е.Н. Сорокина, Е.А. Самаркина, П.Д. Тарасенко // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 4. – С. 179–182.
6. FEMA 350. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. – Washington : FEMA, 2000.
7. NIST GCR 16-917-41. Seismic Design of Steel Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers. Second Edition. – Gaithersburg : NIST, 2016.
8. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах (с Изменениями № 2–4). – М. : Минстрой России, 2018.
9. EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. – Brussels : CEN, 2004.
10. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции (с Изменением № 1). – М. : Минстрой России, 2017.
11. AISC 341-16. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. – Chicago : AISC, 2016.
12. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. – М. : Стандартинформ, 2016.
13. Черных В.Ф. Современные материалы и системы в строительстве / В.Ф. Черных, Е.А. Строителева, Е.В. Шестакова. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2018. – 219 с.
14. СП 313.1325800.2018. Конструкции фибробетонные. Правила проектирования. – М. : Минстрой России, 2018.
15. Рекомендации по расчёту металлических рамных каркасов на сейсмические воздействия. – М.: Стройиздат, 1987.
16. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции (с Изменениями № 1–3). – М. : Минстрой России, 2018.
17. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. – Farmington Hills : ACI, 2019.

References

1. Sorokina E.N. Application of BIM technologies for integrating seismic resistance calculations and reliability assessment of steel structures at the design stage / E.N. Sorokina, V.P. Goncharovskaya, V.R. Ivanchuk // Development of Science and Practice in a Globally Changing World under Risk Conditions (code – MKRN): Collection of Materials of the XXXXII International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 16, 2025. – M. : ANO DPO «ITBO University», 2025. – P. 114–119.
2. Zybin I.K. The use of dampers to enhance the seismic resistance of buildings and structures / I.K. Zybin, A.O. Popov, E.N. Sorokina // Science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2022. – № 4. – P. 123–128.
3. Paulay T. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings / T. Paulay, M.J.N. Priestley. – New-York : Wiley, 1992. – 744 p.
4. Sorokina E.N. On the problem of ensuring seismic resistance of high rise buildings and structures / E.N. Sorokina, A.A. Shakirov, A.A. Shkodin // Science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2023. – № 1. – P. 76–78.
5. Sorokina E.N. Earthquake resistance of low voltage complex devices (LVD) / E.N. Sorokina, E.A. Samarkina, P. D. Tarasenko // Science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2021. – № 4. – P. 179–182.

6. FEMA 350. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. – Washington : FEMA, 2000.
7. NIST GCR 16-917-41. Seismic Design of Steel Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers. Second Edition. – Gaithersburg : NIST, 2016.
8. SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas (with Amendments № 2–4). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
9. EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. – Brussels : CEN, 2004.
10. SP 16.13330.2017. Steel structures (with Amendment № 1). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2017.
11. AISC 341-16. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. – Chicago : AISC, 2016.
12. GOST 27772-2015. Rolled products for steel building structures. – M. : Standartinform, 2016.
13. Chernykh V.F. Modern materials and systems in construction / V.F. Chernykh, E.A. Stroitelova, E.V. Shestakova. – Krasnodar : Kuban State Technological University, 2018. – 219 p.
14. SP 313.1325800.2018. Fiber concrete structures. Design rules. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
15. Recommendations for calculating metal frame structures for seismic loads. – M. : Stroyizdat, 1987.
16. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures (with Amendments № 1–3). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
17. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. – Farmington Hills : ACI, 2019.

УДК 699.841

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ УНИКАЛЬНОГО ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ СЕЙСМИЧЕСКИХ И ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ: КОМПРОМИСС МЕЖДУ АРХИТЕКТУРНОЙ СВОБОДОЙ И БЕЗОПАСНОСТЬЮ

♦♦♦♦♦

OPTIMIZING THE STRUCTURAL DESIGN OF A UNIQUE BUILDING, TAKING INTO ACCOUNT SEISMIC AND WIND LOADS: A COMPROMISE BETWEEN ARCHITECTURAL FREEDOM AND SAFETY

Сорокина Елена Николаевна
кандидат педагогических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
karpanina.elena@yandex.ru

Дубиненко Никита Александрович
лаборант кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
nikita-dubinenko@yandex.com

Карнаушенко Алина Алексеевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
karnaushenkoalina@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается проблема оптимизации конструктивных решений уникальных зданий и сооружений со сложной геометрией и нерегулярными схемами при совместном действии сейсмических и ветровых нагрузок. Анализируется конфликт нормативных требований к жесткости, массе и распределению связей, возникающий из-за принципиально разных механизмов ветрового и сейсмического воздействия. Обсуждаются методы аэродинамического моделирования для зданий сложной формы, не охваченных приложением В СП 20.13330.2016; роль аутригерных систем как универсального инструмента управления жесткостью; применение систем сейсмоизоляции и демпфирования для разрешения противоречия «жесткость – податливость». Приводится сравнение подходов российских и зарубежных норм к нерегулярным конструктивным системам. Даны практические рекомендации по поэтапной оптимизации конструктивной схемы на ранних стадиях проектирования.

Ключевые слова: уникальные здания, оптимизация конструктивной схемы, сейсмические воздействия, ветровые нагрузки, аэродинамическое моделирование, аутригерные системы, нерегулярность, прогрессирующее обрушение.

Sorokina Elena Nikolaevna
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor at the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
karpanina.elena@yandex.ru

Dubinenko Nikita Aleksandrovich
Laboratory Assistant at the Department
of Architecture of Civil and Industrial
Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
nikita-dubinenko@yandex.com

Karnaushenko Alina Alekseevna
Student,
Kuban State Technological University
karnaushenkoalina@yandex.ru

Annotation. The problem of optimizing the design solutions for unique buildings and structures with complex geometry and irregular layouts under the combined action of seismic and wind loads is considered. The conflict between regulatory requirements for rigidity, mass, and the distribution of connections, which arises due to the fundamentally different mechanisms of wind and seismic effects, is analyzed. The methods of aerodynamic modeling for buildings of complex shapes that are not covered by Appendix B of SP 20.13330.2016 are discussed; the role of outrigger systems as a universal tool for managing stiffness; the use of seismic isolation and damping systems to resolve the «stiffness-compliance» contradiction. A comparison of the approaches of Russian and foreign standards to irregular structural systems is provided. Practical recommendations are given for the step-by-step optimization of the structural scheme at the early stages of design.

Keywords: unique buildings, optimization of the structural scheme, seismic impacts, wind loads, aerodynamic modeling, outrigger systems, irregularity, progressive collapse.

Согласно статье 48.1 Градостроительного кодекса РФ, к уникальным относятся объекты капитального строительства высотой более 100 м, пролетами более 100 м, консолями более 20 м или заглублением подземной части более 15 м [1]. Такие объекты по ГОСТ 27751-2014 относятся к повышенному уровню ответственности (КС-3), а по Федеральному закону № 384-ФЗ их конструкции должны обладать прочностью и устойчивостью, исключающими угрозу причинения вреда жизни и здоровью людей [2, 3].

Современная архитектура уникальных зданий все чаще отходит от прямоугольных регулярных схем. Закрученные по высоте башни (twisted buildings), наклонные формы (tilted buildings), многосвязные объемы сложной криволинейной формы, здания с нерегулярным распределением масс и жесткостей – все они создают принципиальные трудности для обеспечения конструктивной безопасности. СП 14.13330.2018 прямо указывает: для сооружений со сложным конструктивно-планировочным решением сейсмические нагрузки следует определять с применением пространственных расчетных динамических моделей и учетом пространственного характера сейсмических воздействий [4].

В настоящий момент тема оптимизации конструктивной схемы уникального здания с учетом действия внешних нагрузок представлена в широком перечне научных публикаций [5–10]. В том числе работа в данном направлении ведется на базе Кубанского государственного технологического университета [11–14].

В рамках данной статьи основной целью было систематизировать методы оптимизации конструктивной схемы уникальных зданий в условиях совместного действия сейсмических и ветровых нагрузок и предложить практический алгоритм поиска компромисса между архитектурной свободой и конструктивной безопасностью.

Ветровые и сейсмические воздействия предъявляют к конструктивной системе противоположные требования. Это противоречие, давно известное в инженерной практике, для зданий сложной макроструктуры (ЗСМ) становится критическим (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнение ветровых и сейсмических нагрузок по параметрам

Параметр	Ветровая нагрузка	Сейсмическая нагрузка
Желаемая жесткость	Высокая – ограничение перемещений и ускорений	Низкая – снижение инерционных сил
Желаемая масса	Минимальная – снижение ветрового отклика	Минимальная – снижение сейсмических сил
Желаемая податливость	Минимальная – комфорт и эксплуатационная пригодность	Максимальная – удлинение периода, отстройка от резонанса
Демпфирование	Полезно для снижения пульсаций	Полезно для рассеяния сейсмической энергии

Для высотных зданий (более 40 этажей) традиционные рамно-связевые системы перестают обеспечивать достаточную горизонтальную жесткость, и возникает потребность в аутригерных этажах – специальных технических уровнях с поясами жесткости, связывающими ядро с периметральными колоннами. Аутригеры одновременно увеличивают изгибную жесткость (что благоприятно для ветра) и создают механизм перераспределения усилий при сейсмическом воздействии, но их эффективность зависит от места расположения по высоте здания (рис. 1).

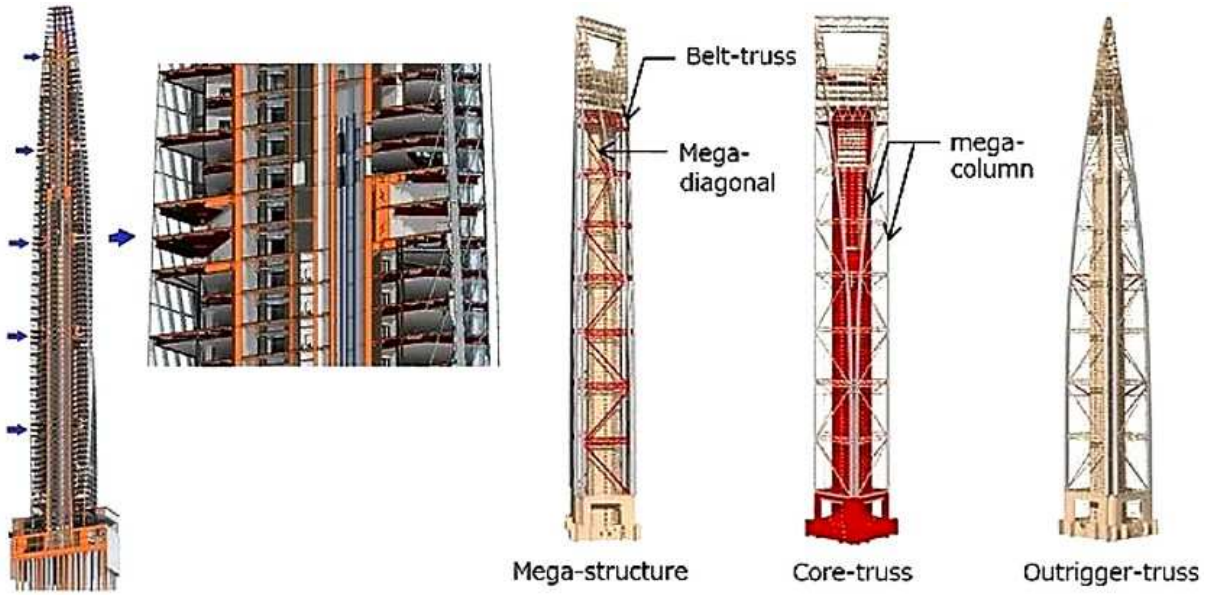


Рисунок 1 – Конструктивные схемы высотных зданий с использованием аутригеров и ядра

СП 14.13330.2018 (п. 4.1) рекомендует принимать симметричные конструктивные и объемно-планировочные решения с равномерным распределением масс и жесткостей в плане и по высоте, обеспечивать динамическую симметрию форм собственных колебаний, когда переме-

щения по первым формам происходят в ортогональных плоскостях и не накладываются друг на друга [4]. Одновременно СП 20.13330.2016 требует учета резонансного вихревого возбуждения и аэродинамически неустойчивых колебаний (галопирования, дивергенции, флаттера) для зданий, у которых отношение высоты к характерному размеру превышает 20 [15].

Для уникальных зданий сложной формы эти два нормативных требования вступают в прямой конфликт: архитектурная концепция часто требует асимметрии, кривизны, закручивания – то есть нерегулярности (рис. 2), которая ухудшает сейсмическое поведение, но может улучшать аэродинамические характеристики (снижать ветровой отклик за счет срыва вихрей).

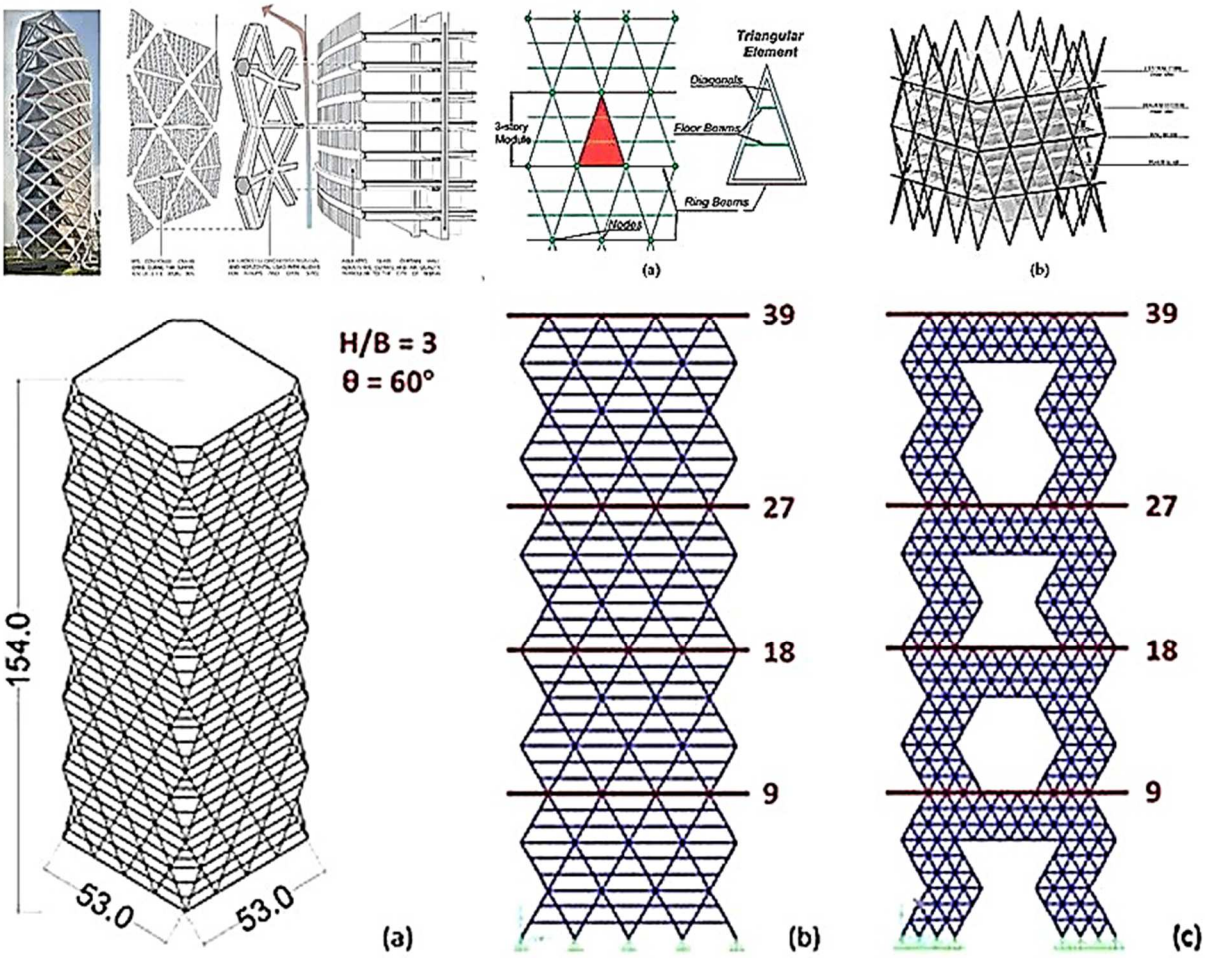


Рисунок 2 – Пример альтернативной несущей системы для здания сложной формы, где наружная оболочка воспринимает горизонтальные нагрузки

СП 14.13330.2018 (п. 5.3, примечание) определяет конструктивно-планировочное решение как простое, если выполняются все нижеперечисленные условия: первая и вторая формы собственных колебаний не являются крутильными; максимальное и среднее значения горизонтальных смещений каждого перекрытия по поступательным формам различаются не более чем на 10 %; периоды всех учитываемых форм отличаются не менее чем на 10 %; перекрытия – жесткие горизонтальные диски на одном уровне; фундаменты на одном уровне (на нескальных грунтах); отсутствие больших проемов, ослабляющих диски перекрытий.

Для большинства уникальных зданий хотя бы одно из этих условий не выполняется, что автоматически переводит объект в категорию «сложных» и требует применения пространственных расчетных динамических моделей (РДМ).

СП 20.13330.2016 (приложение В) содержит аэродинамические коэффициенты для ограниченного набора форм: прямоугольные здания с двускатными и сводчатыми покрытиями, круглые сооружения, здания с уступами, зенитными фонарями и т.д. Для уникальных объектов сложной криволинейной формы (закрученные башни, биоморфные объемы, здания с переменной кривизной) нормативные схемы неприменимы [15]. В этом случае СП 20.13330.2016 допускает определение аэродинамических коэффициентов на основе физического моделирования (испытания в аэродинамической трубе) или численного моделирования (CFD-анализ).

Современный подход к оценке ветровых воздействий на здания сложной формы включает: численное моделирование – решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) с моделями турбулентности k-ωk-ω SST в программных комплексах ANSYS CFX, RWIND Simulation и других; параметрическую оптимизацию – варьирование геометрических параметров (угол закручивания, размер фасок, скругление углов) с целью минимизации ветрового отклика. Введение «коэффициента геометрической адаптации» – отношения площади этажа к реакции сооружения на ветровую нагрузку – позволяет количественно сравнивать варианты формы; машинное обучение – построение регрессионных моделей для прогнозирования аэродинамических коэффициентов на основе базы CFD-расчетов, что сокращает время оптимизации.

Параметрические исследования показывают, что микромодификации формы (скругление углов, фаски) могут снизить ветровую нагрузку на 15–25 %, а макромодификации (закручивание по высоте) – до 30–40 %. Однако те же модификации могут ухудшить сейсмическое поведение, увеличив крутильную нерегулярность (рис. 3).



Рисунок 3 – Пример архитектурной свободы, создающей кручение и нерегулярность (закручивающиеся и наклонные башни)

Для уникальных объектов (особенно высотой более 100 м) физическое моделирование в аэродинамической трубе остается наиболее надежным методом получения распределения давлений по фасаду. Именно по результатам продувки принимаются решения об аутригерных элементах, системе фасадного крепления и параметрах демпферов.

Аутригерный этаж – технический уровень, в котором мощные горизонтальные конструкции (фермы или монолитные стены) связывают центральное ядро жесткости с периметральными колоннами (рис. 4). Это расширяет эффективную базу здания и уменьшает опрокидывающий момент от горизонтальных воздействий. Аутригеры выполняют несколько функций одновременно, напрмер увеличение изгибной жесткости здания – снижает перемещения и ускорения от ветра; перераспределение усилий между ядром и колоннами – благоприятно для сейсмики, противодействие прогрессирующему обрушению – при разрушении части колонн аутригеры распределяют нагрузку на оставшиеся элементы.

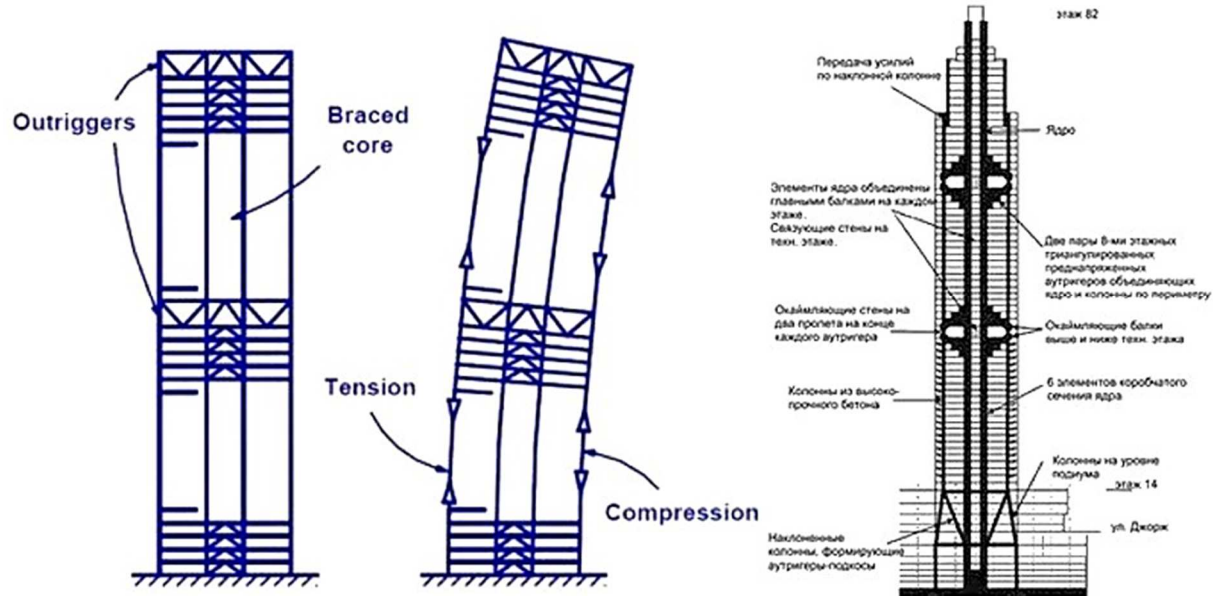


Рисунок 4 – Схема аутригерных этажей и связывания ядра с наружным каркасом

Исследования показывают, что при равном числе аутригеров варьирование только их местоположения по высоте может уменьшить перемещения верха здания более чем на 50 %. Рекомендации по расположению: первый аутригер – на верхнем техническом этаже; второй – на уровне примерно 1/2 высоты здания; для зданий высотой более 200 м – три-четыре аутригерных уровня.

Сравнение конструктивных решений аутригеров (ферменные и монолитные стены) показывает, что ферменные аутригеры на верхнем и среднем уровнях обеспечивают оптимальное соотношение жесткости и материалоемкости: горизонтальные перемещения сокращаются на 24 %, вертикальные – на 36 % по сравнению с зданием без аутригеров.

Аутригерные этажи занимают полный этаж (или два), который не может быть использован для обычных функций (офисы, жилье). Для зданий со сложной криволинейной формой размещение аутригеров осложняется тем, что: при закручивании формы по высоте колонны имеют наклон и поворот, а аутригерная система должна быть строго вертикальной для создания зоны жесткости; расположение аутригеров должно быть согласовано с архитектурными членениями фасада, чтобы не нарушать визуальную концепцию.

Пример разрешения этого конфликта – Лахта центр (Санкт-Петербург, 462 м), где применены пять аутригерных этажей, в том числе нетипичный аутригер в виде полутораметровой железобетонной плиты на 82-м этаже, собирающий накопленную динамическую составляющую и фиксирующий закручивание формы.

Eurocode 8 (через национальные приложения, например НТП РК-08-01.2) классифицирует нерегулярности по трем категориям: регулярные – соответствуют всем критериям распределения жесткостей, масс, прочности и конфигурации; умеренно нерегулярные – допускают расчет с упрощенными моделями, но с дополнительными требованиями; чрезмерно нерегулярные – требуют обязательного нелинейного динамического расчета по акселерограммам [16, 17]. СП 14.13330.2018 не имеет явной классификации нерегулярностей, но через критерии «простоты» (п. 5.3) фактически относит большинство уникальных зданий к категории сложных, требующих пространственных РДМ.

Крутильные колебания при сейсмических воздействиях – главная проблема нерегулярных в плане зданий. Они возникают из-за эксцентриситета между центрами масс и жесткостей, неоднородных деформаций фундаментов, отрыва фундаментов при качательных колебаниях, неравномерности поля сейсмических колебаний основания.

Для зданий сложной формы кручение может быть заложено в самой геометрии: закрученные башни (twisted diagrid buildings) при увеличении угла закручивания показывают рост сейсмической уязвимости – вероятность обрушения увеличивается с углом закручивания, хотя потенциал прогрессирующего обрушения (рис. 5) при этом снижается.

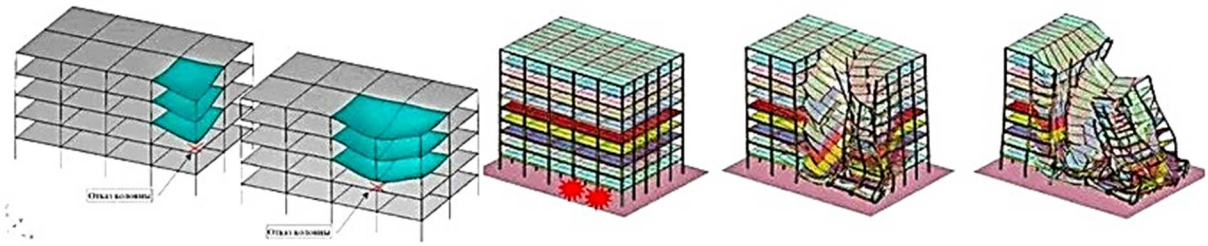


Рисунок 5 – Схемы прогрессирующего обрушения

Резкое изменение жесткости по высоте (подрезка ядра, увеличение высоты этажа в зоне входной группы, зона перехода «ж/б низ – стальной верх») создает эффект «мягкого этажа». Для нерегулярных зданий с жесткостной нерегулярностью межэтажные перемещения при сценарии удаления краевой колонны увеличиваются примерно на 3–4 % по сравнению с регулярными зданиями.

Для уникальных зданий сложной формы применение сейсмоизоляции позволяет принципиально изменить динамические характеристики, удлинив период собственных колебаний и отстроившись от резонанса. СП 14.13330.2018 (п. 4.7б) требует, чтобы системы сейсмоизоляции обеспечивали снижение сейсмических нагрузок не менее чем в два раза относительно здания без системы изоляции. Однако сейсмоизоляция создает проблему с ветровыми нагрузками: здание на гибких опорах получает слишком большие горизонтальные перемещения от ветра. Решение – применение гибридных систем с включающимися/выключающимися связями, которые жестко фиксируют здание при ветровых воздействиях (небольшие перемещения) и освобождают при сейсмических (большие перемещения).

Применение упругопластических связей в зданиях сложной макроструктуры позволяет: обеспечить жесткость на статическую и пульсационную составляющие ветровой нагрузки (УПС работают упруго); снизить сейсмические силы при землетрясении (УПС переходят в пластическое состояние, поглощая энергию); снизить горизонтальные ускорения от расчетного сейсмического толчка практически до значений отдельно стоящего здания. Усилия срабатывания УПС рекомендуется принимать на 5–10% ниже продольных сил в стержнях связей, полученных при расчете на расчетное сейсмическое воздействие.

Для высотных зданий сложной формы применяются: пассивные демпферы – вязкоупругие, фрикционные, металлические (работающие в диапазоне упругопластических деформаций); инерционные гасители – маятниковые (как 800-тонный шар-маятник в Тайбэй 101 или 1000-тонный в Шанхайской башне), компенсирующие как сейсмические, так и ветровые нагрузки; активные системы – датчики, программное обеспечение и приводы для активного управления колебаниями (наиболее затратный, но наиболее гибкий метод).

СП 14.13330.2018 (п. 4.7а) требует, чтобы системы сейсмозащиты в виде устройств рассеивания энергии обеспечивали в каждом полуцикле колебаний поглощение не менее 50 % поступающей сейсмической энергии. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения» относит уникальные объекты (по ст. 48.1 ГрК РФ) к повышенному уровню требований: для них обязательна расчетная проверка с использованием пространственных расчетных схем по особому предельному состоянию с гипотетическим удалением зоны или одного из несущих элементов [18].

Размер зоны локального разрушения принимается: для зданий высотой до 75 м – не менее 28 м^2 (диаметр 6,0 м); для зданий высотой от 75 до 200 м – не менее 80 м^2 (диаметр 10 м); для зданий высотой более 200 м – не менее 100 м^2 (диаметр 11,5 м).

Исследования показывают, что: здания с большей крутильной нерегулярностью (Torsional Irregularity) имеют большее сопротивление прогрессирующему обрушению – за счет того, что при проектировании закладываются большие сечения элементов; здания в зонах высокой сейсмичности имеют меньший потенциал прогрессирующего обрушения, так как проектируются с большим запасом прочности; для нерегулярных зданий оба сценария удаления (внутренние и внешние колонны) должны проверяться, и нет однозначного правила для выбора критического сценария.

Для закрученных диагрид-зданий (twisted diagrid) потенциал прогрессирующего обрушения снижается с увеличением угла закручивания, так как в работе участвует большее число структурных элементов.

Для большепролетных уникальных зданий СП 385.1325800.2018 рекомендует: применение пространственных конструкций (оболочки, висячие покрытия, стержневые системы), обеспечивающих перераспределение усилий при локальном изменении схемы; повышение степени статической неопределимости традиционных конструкций (фермы, рамы, арки); обеспечение пластической работы сварных соединений в предельном состоянии; развитие пластических деформаций в соединениях (не в сечениях элементов).

С учетом анализа нормативов в вопросе подходов к нерегулярным системам можно проследить следующие закономерности (табл. 2) [19].

Таблица 2 – Сравнение нормативных подходов к нерегулярным системам

Параметр	СП 14.13330.2018	Eurocode 8 (EN 1998-1)	ASCE 7-22
Классификация нерегулярностей	Критерии «простоты» (п. 5.3)	Регулярные / умеренно нерегулярные / чрезмерно нерегулярные	Регулярные / нерегулярные (Table 12.3-1)
Расчетная модель для нерегулярных	Пространственная РДМ	Пространственная модель; при чрезмерной нерегулярности – нелинейный динамический расчет	3D-модель; при нерегулярности – модальный спектральный анализ с учетом крутильных форм
Минимальная доля модальной массы	90 % (горизонтальная), 75 % (вертикальная)	90 %	90 %
Сейсмическая изоляция для уникальных	Допускается; снижение не менее чем в 2 раза	Допускается с детальными требованиями	Допускается; специальные требования kpeer-reviewed проекту
Двухуровневое проектирование	РЗ + КЗ (с Изм. № 2)	ULS (475 лет) + SLS (95 лет)	BSE-1E (475 лет) + BSE-2E (2475 лет)
Требования к ветру при сложной форме	СП 20.13330 – CFD или аэродинамическая труба	EN 1991-1-4 – то же	ASCE 7 – Chapter 31 (Wind Tunnel Testing) для гибких или сложных зданий
Защита от прогрессирующего обрушения	СП 385.1325800 – обязательна для уникальных	Не выделена отдельно	ASCE 7 – Section 2.5 (для категорий IV)

Российские нормы в части классификации нерегулярностей носят более общий характер, чем Eurocode 8 и ASCE 7, где приведены явные количественные критерии (отношение максимального к среднему перемещению, отношение жесткостей смежных этажей, геометрические параметры выступов и впадин) [16, 19]. Это создает трудности для проектировщика уникального здания: формально объект может не попадать под критерии «простоты», но невозможно количественно оценить степень нерегулярности и соответствующие дополнительные требования.

На основе проведенного анализа предлагается следующий поэтапный алгоритм оптимизации конструктивной схемы уникального здания сложной формы в условиях сейсмических и ветровых воздействий:

Этап 1. Предварительная оценка (концептуальное проектирование):

1. Определить класс объекта по ст. 48.1 ГрК РФ и уровень ответственности по ГОСТ 27751-2014.
2. Оценить нормативную и расчетную сейсмичность площадки (по картам ОСР-2016, с учетом грунтовых условий – категории I–IV по СП 14.13330.2018).
3. Определить ветровой район и тип местности по СП 20.13330.2016.
4. Выполнить предварительную оценку регулярности: совпадение центров масс и жесткостей, равномерность распределения жесткостей по высоте, симметричность плана.
5. При выявленной нерегулярности – наметить конструктивные меры по ее снижению, не меняя архитектурную концепцию (перераспределение диафрагм, добавление связей, корректировка сечений).

Этап 2. Аэродинамическая оптимизация:

1. Выполнить CFD-моделирование обтекания здания для 8–16 направлений ветра с шагом 22,5–45°.
2. При наличии данных аэродинамической трубы – верифицировать CFD-результаты (рис. 6).

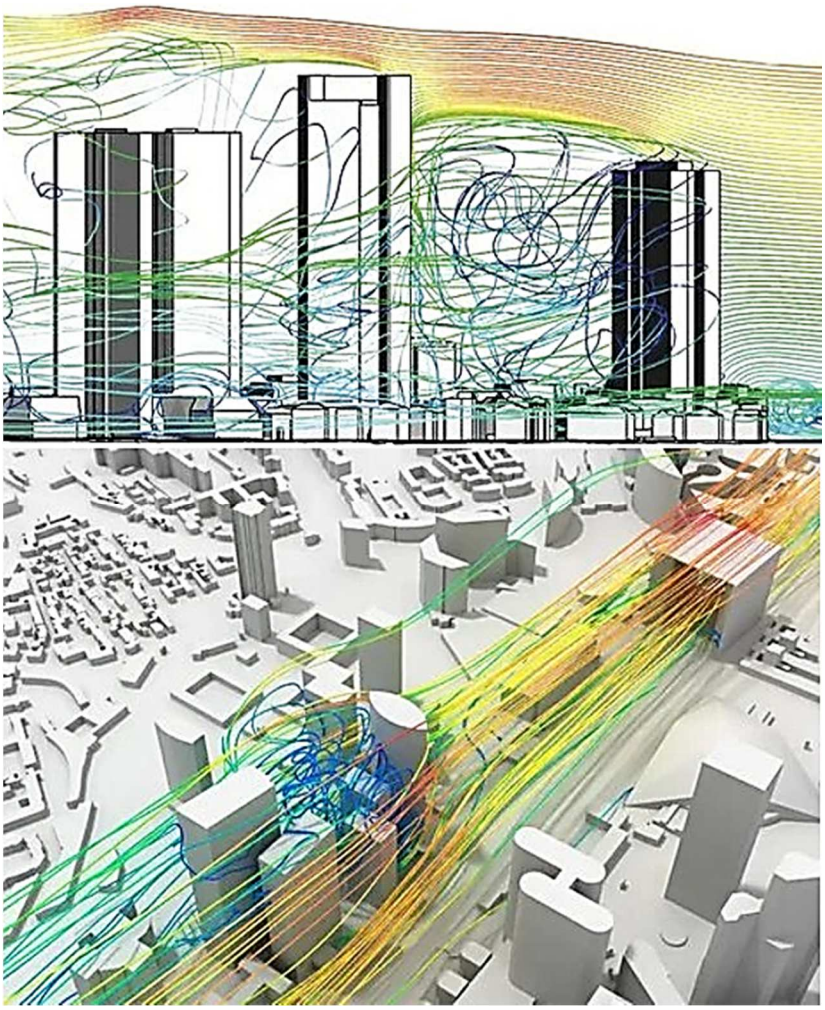
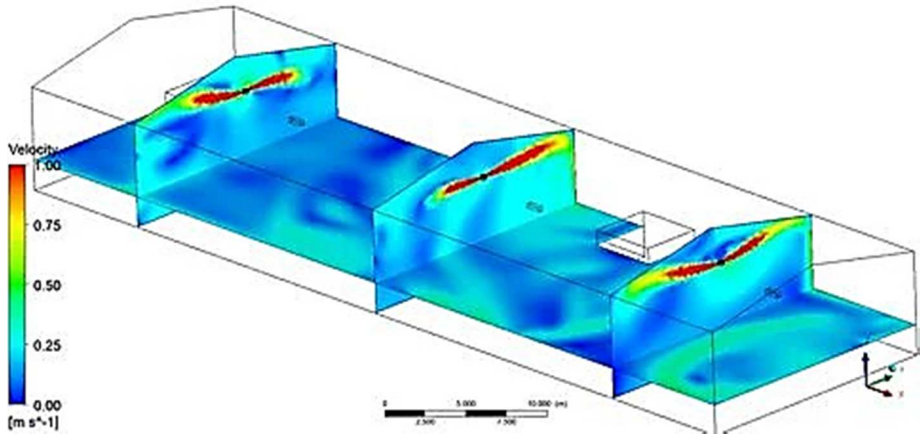


Рисунок 6 – Визуализация воздушных потоков вокруг зданий сложной формы, как результат CFD-расчета



Окончание рисунка 6

3. Провести параметрическую оптимизацию формы: варьирование угла закручивания, размеров фасок, скругления углов, сужения по высоте.

4. Выбрать оптимальную форму по критерию минимального ветрового отклика при сохранении архитектурной концепции.

5. Проверить отсутствие аэродинамически неустойчивых колебаний (галопирование, флаттер, дивергенция) по СП 20.13330.2016.

Этап 3. Формирование конструктивной схемы:

1. Выбрать тип несущей системы: ядро + периметральные колонны (с аутригерами для высоты более 40 этажей), диагрид, трубчатая система, ствольно-подвесная и т.д.

2. Назначить Preliminary расположение аутригерных этажей (верхний технический этаж + середина высоты) и проверить их совместимость с архитектурной концепцией.

3. Обеспечить жесткие диски перекрытий (монолитные сталежелезобетонные с гибкими упорами) для передачи горизонтальных сил на ядра/диафрагмы.

4. Проверить кручение: отношение максимального перемещения к среднему по каждому этажу не должно превышать нормативных порогов.

Этап 4. Многовариантный расчет:

1. Построить пространственную РДМ с учетом взаимодействия с грунтом.

2. Выполнить модальный анализ: проверить, что сумма эффективных модальных масс составляет не менее 90 % для горизонтальных и 75 % для вертикальных воздействий; учесть все формы с эффективной модальной массой более 5 %; для сложных систем с неравномерным распределением жесткостей и масс учесть остаточный член от отброшенных форм.

3. Выполнить линейно-спектральный расчет (ЛСМ) по СП 14.13330.2018 для расчетной ситуации РЗ.

4. Выполнить расчет на пульсационную составляющую ветровой нагрузки по СП 20.13330.2016.

5. Сравнить перемещения и ускорения: если ветровые перемещения превышают предельные – усилить аутригеры/ядро; если сейсмические усилия превышают несущую способность – рассмотреть сейсмоизоляцию или демпферы.

Этап 5. Нелинейный расчет и верификация:

1. Выполнить расчет на сейсмическое воздействие уровня К3 (контрольное землетрясение) с учетом нелинейности – для оценки способности системы к перераспределению усилий через пластические шарниры.

2. При применении сейсмоизоляции или демпферов – выполнить прямой динамический расчет по акселерограммам (не менее трем пар компонент), верифицированным для площадки строительства.

3. Выполнить Pushover-анализ для оценки последовательности образования пластических шарниров и проверки «мягких этажей».

4. Проверить защиту от прогрессирующего обрушения по СП 385.1325800.2018 – с удалением несущих элементов в наиболее критических зонах (где концентрируются напряжения от сейсмического воздействия, кручения или резкого изменения жесткости).

Этап 6. Итерационная оптимизация:

1. На основе результатов этапов 4–5 вернуться к корректировке конструктивной схемы: изменить сечения, перераспределить связи, скорректировать положение аутригеров.

2. Повторить цикл до выполнения всех нормативных требований при минимальной материалоемкости.

3. Зафиксировать компромиссные решения: какие архитектурные элементы сохранены без изменений, какие адаптированы, какие потребовали специальных технических условий (СТУ).

Таким образом, по результатам проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Конфликт между требованиями ветровой и сейсмической безопасности для уникальных зданий сложной формы разрешим через комплексный подход: аэродинамическую оптимизацию формы, применение аутригерных систем, использование гибридных сейсмоизолирующих устройств с включающимися/выключающимися связями, демпферов и инерционных гасителей.

2. Аутригерные системы являются универсальным инструментом, благоприятным одновременно для ветра (увеличение жесткости, снижение перемещений и ускорений) и для сейсмики (перераспределение усилий, противодействие прогрессирующему обрушению). Оптимизация их расположения по высоте позволяет сократить перемещения верха здания более чем на 50 %.

3. Аэродинамическое моделирование (CFD + аэродинамическая труба) – обязательный этап для уникальных зданий сложной формы, поскольку нормативные коэффициенты СП 20.13330.2016 не охватывают криволинейные, закрученные и биоморфные формы. Параметрическая оптимизация формы может снизить ветровую нагрузку на 15–40 %.

4. Нерегулярность – главный фактор риска для сейсмостойкости уникальных зданий. Российские нормы (СП 14.13330.2018) не имеют детальной количественной классификации нерегулярностей, в отличие от Eurocode 8 и ASCE 7. Для уникальных объектов необходимо обязательное нелинейное динамическое расчетное обоснование, независимо от формальной классификации.

5. Защита от прогрессирующего обрушения по СП 385.1325800.2018 – обязательная составляющая проектирования уникальных зданий. Нерегулярность может как ухудшать (эффект «мягкого этажа»), так и парадоксально улучшать (за счет больших запасов сечений) сопротивление прогрессирующему обрушению – это требует индивидуальной проверки для каждого объекта.

6. Предлагаемый алгоритм из шести этапов – от концептуальной оценки до итерационной оптимизации – обеспечивает систематический поиск компромисса между архитектурной свободой и конструктивной безопасностью уникального здания. Ключевой принцип: архитектурная форма не «накладывается» на конструктивную схему, а сопрягается с ней через итерационный процесс совместной оптимизации.

Литература

1. Градостроительный кодекс РФ. Статья 48.1. Особо опасные, технически сложные и уникальные объекты.
2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2015.
3. Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений.
4. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* (с Изменениями № 2–4). – М. : Минстрой России, 2018.
5. Kim J. Progressive Collapse and Seismic Performance of Twisted Diagrid Buildings / J. Kim, M. Kwon // CTBUH 2014 Conference Proceedings. – Shanghai, 2014.
6. Раззаков С.Р. Моделирование стадийности строительства, эксплуатации и конструктивной безопасности большепролетных уникальных зданий // Известия КазГАСУ. – 2024. – № 4 (70).
7. Облетов Е.Н. Параметрическое моделирование сложной геометрии высотного здания: анализ влияния ветровой нагрузки и оптимизация / Е.Н. Облетов [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2024. – № 1. – С. 278–285.
8. Ghorbani R. Progressive collapse potential of different types of irregular buildings located in diverse seismic sites / R. Ghorbani, A. Arman // Heliyon. – 2018. – Vol. 4. – № 12.
9. Никонов Н. Н. Особенности проектирования уникальных объектов // Наука и безопасность. – 2011. – № 1(9). – С. 51–63.
10. Evaluation of the role of outrigger storeys in providing lateral stability to tall buildings / Y. Feng [et al.] // Construction in Seismic Regions. – 2024. – P. 261–264.
11. Сорокина Е.Н. Применение BIM-технологий для интеграции расчетов сейсмостойкости и оценки надежности стальных конструкций на стадии проектирования / Е.Н. Сорокина, В.П. Гончаровская, В.Р. Иванчук // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр – МКРНП) : Сборник материалов XXXXII Международной научно-практической конференции, Москва, 16 декабря 2025 года. – М. : «АНО ДПО «Университет ИТБО», 2025. – С. 114–119.
12. Зыбин И.К. Применение демпферов для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений / И.К. Зыбин, А.О. Попов, Е.Н. Сорокина // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2022. – № 4. – С. 123–128.
13. Сорокина Е.Н. К проблеме обеспечения сейсмостойкости высотных зданий и сооружений / Е.Н. Сорокина, А.А. Шакиров, А.А. Шкодин // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 3. – С. 76–78.

14. Сорокина Е.Н. Сейсмостойкость низковольтных комплексных устройств (НКУ) / Е.Н. Сорокина, Е.А. Самаркина, П.Д. Тарасенко // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 4. – С. 179–182.
15. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1–6). – М. : Минстрой России, 2016.
16. EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. – Brussels : CEN, 2004.
17. НТП РК 08-01.2-2021. Проектирование сейсмостойких зданий. Часть: Проектирование гражданских зданий. Общие требования (к СП РК EN 1998-1:2004/2012). – Астана, 2021.
18. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменением №1). – М. : Минстрой России, 2018.
19. ASCE/SEI 7-22. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. – Reston : ASCE, 2022.

References

1. Urban Planning Code of the Russian Federation. Article 48.1. Particularly hazardous, technically complex and unique facilities.
2. GOST 27751-2014. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions. – M. : Standartinform, 2015.
3. Federal Law № 384-FZ dated December 30, 2009. Technical Regulation on the Safety of Buildings and Structures.
4. SP 14.13330.2018. Construction in Seismic Areas. Updated version of SNiP II-7-81* (with Amendments № 2–4). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
5. Kim J. Progressive Collapse and Seismic Performance of Twisted Diagrid Buildings / J. Kim, M. Kwon // CTBUH 2014 Conference Proceedings. – Shanghai, 2014.
6. Razzakov S.R. Modeling the stages of construction, operation, and structural safety of large span unique buildings // Izvestiya KazGASU. – 2024. – № 4(70).
7. Parametric modeling of the complex geometry of a high rise building: analysis of the influence of wind load and optimization / E.N. Obletov [et al.] // Privolzhsky Scientific Journal. – 2024. – № 1. – P. 278–285.
8. Ghorbani R. Progressive collapse potential of different types of irregular buildings located in diverse seismic sites / R. Ghorbani, A. Arman // Heliyon. – 2018. – Vol. 4. – № 12.
9. Nikonov N.N. Features of Designing Unique Objects // Science and Safety. – 2011. – № 1(9). – P. 51–63.
10. Evaluation of the role of outrigger storeys in providing lateral stability to tall buildings / Y. Feng [et al.] // Construction in Seismic Regions. – 2024. – P. 261–264.
11. Sorokina E.N. Application of BIM technologies for integrating seismic resistance calculations and reliability assessment of steel structures at the design stage / E.N. Sorokina, V.P. Goncharovskaya, V.R. Ivanchuk // Development of science and practice in a globally changing world under conditions of risks (code – MKRN): Collection of materials of the XXXXII International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 16, 2025. – M. : ANO DPO «ITBO University», 2025. – P. 114–119.
12. Zybin I.K. The use of dampers to increase the seismic resistance of buildings and structures / I.K. Zybin, A.O. Popov, E.N. Sorokina // Science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2022. – № 4. – P. 123–128.
13. Sorokina E.N. On the problem of ensuring the seismic resistance of high rise buildings and structures / E.N. Sorokina, A.A. Shakirov, A.A. Shkodin // Science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2023. – № 1. – P. 76–78.
14. Sorokina E.N. Seismic resistance of low voltage complex devices (LVD) / E.N. Sorokina, E.A. Samarkina, P.D. Tarasenko // Science. Technic. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2021. – № 4. – P. 179–182.
15. SP 20.13330.2016. Loads and Effects. Updated version of SNIP 2.01.07-85* (with Amendments № 1–6). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2016.
16. EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. – Brussels : CEN, 2004.
17. NTP RK 08-01.2-2021. Design of earthquake resistant buildings. Part: Design of civil buildings. General requirements (to SP RK EN 1998-1:2004/2012). – Astana, 2021.
18. SP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design rules. Main provisions (with Amendment № 1). – M. : Ministry of Construction of Russia, 2018.
19. ASCE/SEI 7-22. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. – Reston : ASCE, 2022.

УДК 691.3

ВОЗМОЖНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

♦♦♦♦♦

FEASIBILITY AND PROSPECTS OF USING INDUSTRIAL SECONDARY RAW MATERIALS IN CONSTRUCTION

Стурова Виктория Андреевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры строительного материаловедения
и дорожных технологий,
Липецкий государственный технический университет
v-livenceva@mail.ru

Аннотация. Данная статья посвящена применению вторичных ресурсов промышленных производств, таких как как доменных шлаков, отсевов от их дробления (шлакового песка) и тонкомолотой шлакопемзовой добавки в качестве возможной замены традиционных компонентов бетонной матрицы.

Ключевые слова: шлакобетон, шлаковый песок, расслаиваемость, вязкость.

Sturova Viktoria Andreevna
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor in the Department
of Construction Materials Science
and Road Technologies,
Lipetsk State Technical University
v-livenceva@mail.ru

Annotation. This article is devoted to the use of secondary resources from industrial production, such as blast-furnace slag, screenings from their crushing (slag sand), and finely ground slag-pumice additive, as a possible replacement for traditional components of the concrete matrix.

Keywords: slag concrete, slag sand, segregation, viscosity.

В современном строительном материаловедении применение вторичных ресурсов и техногенных отходов перешло из категории экспериментальных экологических инициатив в статус обязательного индустриального тренда.

Основными драйверами выступают концепция циклической экономики (*Circular Economy*), жесткие требования по снижению углеродного следа (*Carbon Footprint*) и экономическая выгода – использование отходов позволяет покрыть до 40 % потребности в сырье, снижая себестоимость готовой продукции на 10–30 %.

Применение вторичного сырья промышленного производства в строительстве снижает стоимость материалов и расширяет сырьевую базу, одновременно уменьшая нагрузку на экологию.

Основные возможности применения отходов металлургии и энергетики, таких как доменных шлаков, отходов от их дробления, золы-унос и золы ТЭЦ активно используются как активные минеральные добавки в производстве цементов, бетонов и сухих строительных смесей или в качестве альтернативной заменый существующим традиционным компонентам.

Вектор современных исследований в области шлакобетона сместился с простого использования промышленных отходов в сторону экологии, цифровизации и создания «умных» материалов, однако особенности подбора состава и компонентов исходного материала, остаются актуальными и на сегодняшний день. В настоящее время шлакобетон рассматривается не как дешевый заменитель классического бетона, а как основа для технологического прорыва в строительстве.

В своей работе я рассмотрела и привела особенности применения отходов промышленных производств, таких как доменных шлаков и отсевов от их дробления (шлакового песка) в качестве возможной замены традиционных компонентов бетонной матрицы.

В качестве отходов промышленного производства приняты пористые материалы на основе литого шлакового щебня (ЛШЩ) металлургического предприятия ПАО НЛМК. После дробления ЛШЩ остаются вторичные дополнительные отходы в виде шлакового песка, количество которого возрастает с каждым годом [1].

Липецкая область – это уникальный район, обладающий большими запасами шлаковых материалов и других благодаря работе на ее территории ПАО НЛМК. Поэтому изучение свойств материала на основе отходов ПАО НЛМК путем введения в матрицу бетона шлаковых заполнителей из отсевов дробления и вторичных отходов доменного производства является одной из актуальных проблем, решаемых данным способом.

Одной из проблем использования такого материала является сложность подбора состава, так как при его разработке необходимо учитывать множество факторов. Одной из особенностей этого бетона является наличие в его составе тонкомолотой добавки, взятой в соотношении 1:1 с цементом.

В соответствии с современными представлениями бетон можно приготовить как неоднородное гетерогенное тело, в котором сочетается структура пористого камня с втопленными в него заполнителями разных размеров и микропор, расположенных в цементном камне и заполнителем, а также в зонах контакта между ними. Свойство затвердевшего бетона зависит от свойств исходных компонентов, характера физико-химического и физического взаимодействия между ними. Все это определяет неоднородности бетона – весьма существенного фактора предопределяющего, в свою очередь, его прочность, деформативность и стойкость.

В бетоне как техническом материале конгломератного строения различают твердую фазу зерно заполнителя, частицы микрозаполнителя и непрогидритированного вяжущего, объединение вместе с цементным камнем, капиллярно-поровую структуру, образуемую заполненным воздухом и свободной водой затворения, а также зону контакта цементного камня с заполнителем.

В качестве вторичных отходов промышленных производств предлагается также применение тонкомолотой шлакопемзовой добавки – это активный минеральный компонент, получаемый путем сверхтонкого измельчения шлаковой пемзы (пористого металлургического шлака, образующегося при быстром охлаждении доменных расплавов водой или воздухом). Благодаря высокому содержанию активного кремнезема (SiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3), она обладает выраженными гидравлическими и пуццолановыми свойствами, что делает ее востребованной в производстве бетонов, цементов и сухих строительных смесей. В качестве отходов возможно применение также отходов местного производства различных изготовителей стальных волокон (фибр): фрезерованные из стального листа, рубленные из холоднокатаной стальной проволоки волнистого очертания, волнистого очертания, рубленные из проволок различного диаметра отработанных стальных канатов и т.д. [2–4].

Наличие в составе изучаемого бетона тонкомолотой шлакопемзовой добавки, повышает насыщенность шлаком как цементного камня, так и бетона в целом. Так получается более родственная структура цементного камня, насыщенного добавкой. Адгезия цементного камня к заполнителю зависит также от состояния поверхности заполнителя. В нашем случае шлаковая пемза имеет развитую открытую пористость, в пустоты которой проникает цементный камень и образует с заполнителем прочное сцепление.

Высокая насыщенность шлакопемзобетона шлаковой пемзой, играет роль активного макрозаполнителя и заполнителя, несомненно, является важнейшим фактором, способствующим повышение микроструктуры макрооднородности изучаемого материала. Шлаковая пемза, полученная гидроэкранным способом, имеет развитую и открытую пористость.

Получают этот пористый заполнитель на доменных шлаков предельных и литейных чугунов. Колебания в химическом составе шлаковой пемзы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав шлаковой пемзы

Содержание основных оксидов, % массы						
CaO	SiO_2	Al_2O_3	M_3O	Fe_2O_3	MnO	$S_{общ}$
40,08	37,77	11,97	9,81	0,20	0,24	0,69

Основные физико-механические и теплофизические свойства шлаковой пемзы определяются главным образом характером ее пористо-капиллярной структуры, минералогическим, фазовым составом, особенностями микроструктуры показаны на рисунках 1 и 2.

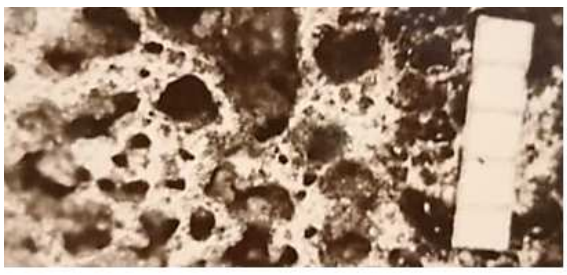


Рисунок 1 – Макроструктура шлаковой пемзы



Рисунок 2 – Микроструктура шлаковой пемзы. Видны кристаллы мелилита

Минералогический состав шлаковой пемзы определяется свойствами расплава, связанными с его химическим составом, температурой шлака в момент обработки, а также способом поризации [1].

Основные физико-механические свойства шлакопемзового песка и шлакопемзовой добавки представлены в таблицах 2 и 3.

Из таблицы 4 видно, что на шлаковой пемзе НЛМК можно получить конструктивный шлакопемзобетон с объемной массой 2100–2200 кг/м^3 классов В30 – 40 с использованием составов бетонной смеси.

Таблица 2 – Основные физико-механические свойства шлакопемзового песка

Наименование свойств	Единица измерения	Показатели свойств
Плотность	г/см^3	2,90
Пустотность	%	58
Водопотребность	%	42,3
Удельная поверхность	м^2/т	197,8
Объемная насыпная масса	кг/м^3	980–1180

Таблица 3 – Основные свойства шлакопемзовой добавки

Наименование свойств	Единица измерения	Показатели свойств
Модуль основности	–	0,89–1,08
Модуль активности	–	0,26–0,38
Глиноземистый модуль	–	16,8–18,4
Коэффициент качества	–	1,54
Коэффициент насыщения	–	1,99
Удельная поверхность	см^2/г	2500–3300

В результате проведенных экспериментов прочность на растяжение шлакопемзобетона, полученная при испытании кубов на ребро, оказалось большей по сравнению со значениями, полученными при испытании балочек на изгиб, а также больше величин, рекомендуемые СП 63.13330.2018 для соответствующей прочности шлакопемзобетона.

Таблица 4 – Характеристики бетона

Класс бетона	Объемная масса бетона после 28-дневного хранения, кг/м^3	Прочность* при сжатии после 28 дней нормального хранения	
		$P_{разр}$, кН	$\bar{R}$, МПа
В30	2100	330	33,6
В40	2160	380	38,0

* – по данным испытаний шести образцов-близнецов.

Результаты проведенных испытаний по определению влияния крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси, приведены в таблице 5 и на рисунках 3–6.

Таблица 5 – Влияние крупности шлакового песка на характеристики растворной смеси

Модуль крупности песка	Водоотделение (рис. 3)		Расслаива-емость (рис. 4)		Вязкость (рис. 5)		Расплыв конуса (рис. 6)	
	состав 1	состав 2	состав 1	состав 2	состав 1	состав 2	песок (шлак)	песок природный
	мл/л	мл/л	–	–	Па · с	Па · с		
1,5	26,74	24	0,85	0,9	8,2	9,8	11	15
1,71	27,79	24,92	0,911	0,95	5,8	7	14	16
1,95	28,95	26,13	0,966	0,98	3,8	4,6	17	19
2,27	31,33	26,13	0,96	0,95	2,2	3,2	19	21
2,47	33,92	27,79	0,845	0,904	2,6	2,6	22	21,8
2,73	36,46	29	0,574	0,82	3,3	3	21	22
2,94	38,18	30	0,435	0,615	4,2	4	20	22,1

Результаты определения области оптимальных зерновых составов песков из отсевов дробления литого шлакового щебня производства НЛМК показали достаточную корреляцию с данными, полученными при испытании песков в бетонных смесях (рис. 3–6).

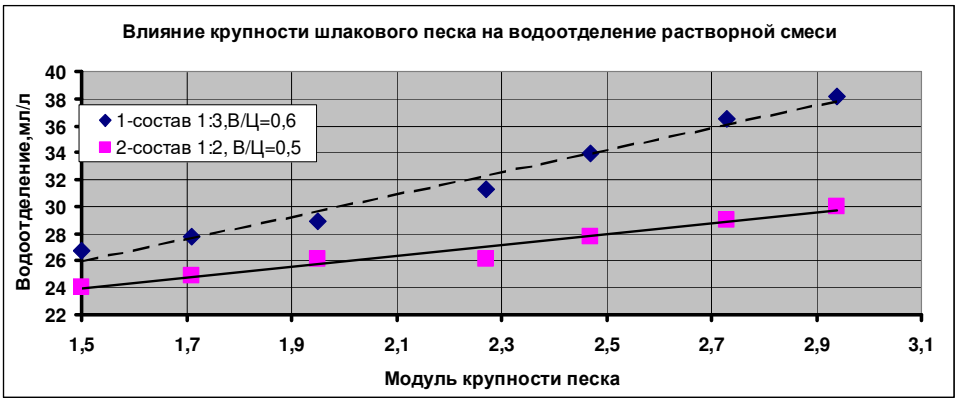


Рисунок 3 – Влияние крупности шлакового песка на водоотделение

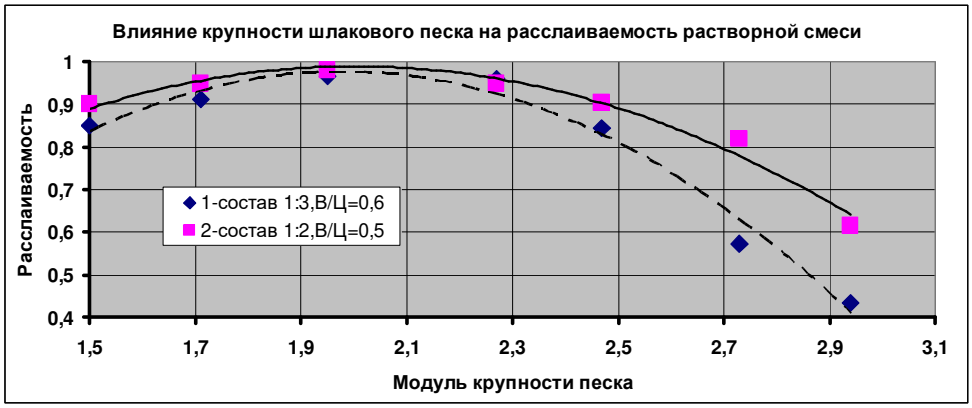


Рисунок 4 – Влияние крупности шлакового песка на расслаиваемость

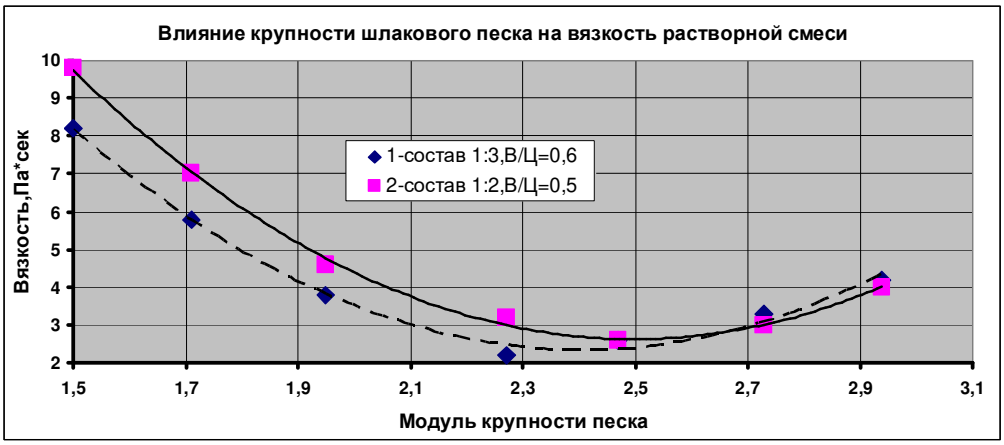


Рисунок 5 – Влияние крупности шлакового песка на вязкость

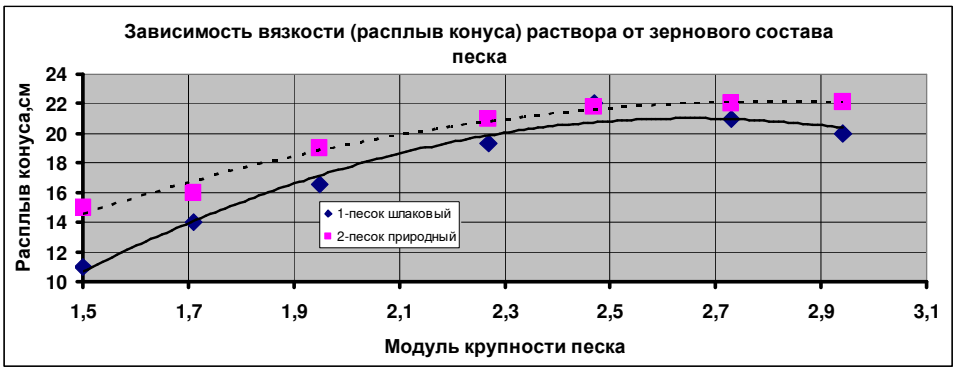


Рисунок 6 – Влияние крупности шлакового песка на расплыв конуса

Приведённые исследование подтвердили предположение и доказали возможность применения отходов промышленных производств в качестве альтернативной замены традиционных компонентов бетонной матрицы, без потери физико-механических свойств.

Ключевые преимущества:

1. Исключительное соотношение прочности и веса: материал имеет высокие классы прочности на сжатие – В30 (соответствует марке М400, выдерживает до 39,3 МПа) и В40 (соответствует М500, выдерживает до 52,3 МПа).

2. При этом его объемная масса существенно ниже, чем у классического тяжелого бетона (экономия веса конструкций составляет от 15 % до 30 %). Это снижает нагрузку на фундаменты зданий и позволяет уменьшить сечение несущих элементов.

3. Повышенная однородность и трещиностойкость. Отсутствие крупного щебня и использование мелкозернистой структуры исключает расслоение смеси при транспортировке и укладке.

4. Высокая плотность структуры матрицы и коррозионная стойкость. Использование шлаковой пемзы и вяжущего высоких марок обеспечивает плотное сцепление цементного камня с шероховатой поверхностью пористого заполнителя.

5. Шлаковое происхождение заполнителя придает бетону химическую стойкость к агрессивным средам (сульфатным, кислотным), что делает его незаменимым в промышленном строительстве.

6. Повышенная долговечность и морозостойкость. За счет замкнутой пористости материала и оптимизированного зернового состава показатели морозостойкости могут достигать уровней F200–F400, а водонепроницаемость – W8–W14. Бетон крайне медленно разрушается под воздействием циклов замораживания и оттаивания.

7. Экологичность и экономическая выгода, производство шлаковой пемзы утилизирует отходы металлургической промышленности (доменные шлаки), снижая экологическую нагрузку.

8. Возможность переход к экономике замкнутого цикла.

Литература

1. Черноусов Н.Н. Математическая модель полной диаграммы деформирования шлакобетона при трехточечном изгибе / Н.Н. Черноусов, В.А. Стурова // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 3. – С. 92–96.
2. Гончарова М.А. Сталефибробетон: новые возможности и перспективные разработки : монография / М.А. Гончарова, В.А. Стурова. – Липецк – Елец, 2023. – 162 с.
3. Применение фибры Dramix производства компании Бекарт в строительстве / Б.А. Бондарев [и др.] // В сборнике: Современные проблемы материаловедения. Сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ. – Липецк, 2021. – С. 340–342.
4. Исследование прочностных свойств сталефиброшлакобетона при осевом растяжении и сжатии с учетом его возраста / Б.А. Бондарев [и др.] // Строительные материалы. – 2017. – № 5. – С. 20–25.
5. Валуев Д.В. Технологии переработки металлургических отходов : учеб. пособие / Д.В. Валуев, Р.А. Гизатулин // Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск, 2013. – 191 с.
6. Гудим Ю.А. Современные способы безотходной утилизации шлаков / Ю.А. Гудим, С.Г. Овчинников, И.Ю. Зинуров // Сталь. – 2009. – № 7. – С. 93–95.

References

1. Chernousov N.N. Mathematical model of the complete deformation diagram of slag concrete under three-point bending / N.N. Chernousov, V.A. Sturova // Modern High-Tech Technologies. – 2020. – № 3. – P. 92–96.
2. Goncharova M.A. Steel-fiber-reinforced concrete: new opportunities and promising developments : monograph / M.A. Goncharova, V.A. Sturova. – Lipetsk – Yelets, 2023. – 162 p.
3. Application of Dramix fiber (manufactured by Bekaert) in construction / B.A. Bondarev [et al.] // In the collection: Modern Problems of Materials Science. Collection of scientific papers of the II All-Russian (National) Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of LSTU. – Lipetsk, 2021. – P. 340–342.
4. Investigation of strength properties of steel-fiber-reinforced slag concrete under axial tension and compression, taking into account its age / B.A. Bondarev [et al.] // Construction Materials. – 2017. – № 5. – P. 20–25.
5. Valuev D.V. Technologies for metallurgical waste processing: study guide / D.V. Valuev, R.A. Gizatulin // National Research Tomsk Polytechnic University (TPU). – Tomsk, 2013. – 191 p.
6. Gudim Yu.A. Modern methods of zero-waste slag utilization / Yu.A. Gudim, S.G. Ovchinnikov, I.Yu. Zinurov // Stal. – 2009. – № 7. – P. 93–95.

УДК 691.32

ВЛИЯНИЕ СВЕТООТРАЖАЮЩЕГО КОМПОНЕНТА НА ЯРКОСТЬ И ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ СВЕТЯЩЕГОСЯ БЕТОНА

♦♦♦♦♦

THE INFLUENCE OF A REFLECTIVE COMPONENT ON THE BRIGHTNESS AND DURATION OF AFTERGLOW OF LUMINOUS CONCRETE

Сулейманова Людмила Александровна
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой строительства
и городского хозяйства,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова

Кравченко Дарья Эдуардовна
ассистент кафедры строительства
и городского хозяйства,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова
kafedrasigsh@mail.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние светоотражающего компонента на интенсивность и длительность послесвечения светящегося бетона. Исследованы образцы светящегося бетона с содержанием светоотражающего компонента от 0 до 25 % от массы портландцемента с интервалом варьирования 5 % при постоянном содержании фотолюминесцентного пигмента. Установлено, что светоотражающий компонент усиливает эффект свечения за счет отражения света излучаемым фотолюминесцентным пигментом. Наиболее эффективным по совокупности показателей начальной яркости и времени послесвечения является состав с содержанием светоотражающего компонента 10 %, для которого начальная яркость составила 3,25 кд/м^2, а длительность послесвечения превысила 6 ч. В образцах без светоотражающего компонента и с его содержанием 5 % начальная яркость составила 2,75 кд/м^2, а длительность послесвечения – 5 ч. При содержании компонента 20–25 % эти показатели снизились до 1,5 кд/м^2 и 4 ч соответственно.

Ключевые слова: светящийся бетон, люминесцентный пигмент, светоотражающий компонент, послесвечение, яркость, оптимальное содержание.

Suleymanova Lyudmila Alexandrovna
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Head of the Department
of Construction and Municipal Services
Belgorod State Technological University
named After V.G. Shukhov

Kravchenko Darya Eduardovna
Assistant Lecturer of the Department
of Construction and Municipal Services,
Belgorod State Technological University
named After V.G. Shukhov
kafedrasigsh@mail.ru

Annotation. The study investigated the effect of the reflective component on the intensity and duration of the afterglow of luminous concrete. Samples of luminous concrete with a reflective component content ranging from 0 to 25 % of the Portland cement mass, with an interval of 5 %, were examined at a constant content of photoluminescent pigment. It was established that the reflective component enhances the glow effect due to the reflection of light emitted by the photoluminescent pigment. The most effective in terms of the combined indicators of initial brightness and afterglow duration is the composition containing 10 % reflective component, for which the initial brightness was 3.25 cd/m^2, and the afterglow duration exceeded 6 hours. In samples without a reflective component and with a 5 % content of the component, the initial brightness was 2.75 cd/m^2, and the afterglow duration was 5 hours. With a component content of 20–25 %, these indicators decreased to 1.5 cd/m^2 and 4 hours, respectively.

Keywords: luminous concrete, luminescent pigment, light-reflecting powder, afterglow, brightness, optimal content.

Современное строительство ориентировано на повышение безопасности, энергоэффективности, долговечности и архитектурной выразительности городской среды. Одним из перспективных направлений является создание светящихся бетонов, содержащих фотолюминесцентные пигменты, способные аккумулировать световую энергию и излучать ее в темноте. Такие материалы могут применяться для дорожной разметки, пешеходных переходов, велодорожек, аварийных выходов, а также фасадов зданий и малых архитектурных форм [1–8].

Однако широкое внедрение светящихся бетонов ограничено недостаточной яркостью послесвечения, относительно быстрым затуханием и высокой стоимостью фотолюминесцентных пигментов. Для повышения эффективности светящихся бетонов в их состав вводят светоотражающий компонент, который отражает свет, излучаемый пигментом, и тем самым усиливает визуальный эффект свечения. При этом содержание светоотражающего компонента должно быть оптимальным: недостаточное количество не дает выраженного эффекта, а избыточное может привести к ухудшению структуры материала и снижению светотехнических характеристик [9–13].

Целью работы является определение содержания светоотражающего компонента в образцах светящегося бетона.

Были изготовлены образцы светящегося бетона с различным содержанием светоотражающего компонента: 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % и 25 % от массы портландцемента при постоянном содержании фотолюминесцентного пигмента. Фиксацию послесвечения выполняли через 10, 60, 120, 240 и 360 мин. Оценивали начальную яркость послесвечения (кд/м^2) и время послесвечения (ч).

Визуальная динамика послесвечения образцов с различным содержанием светоотражающего компонента представлена на рисунке 1.

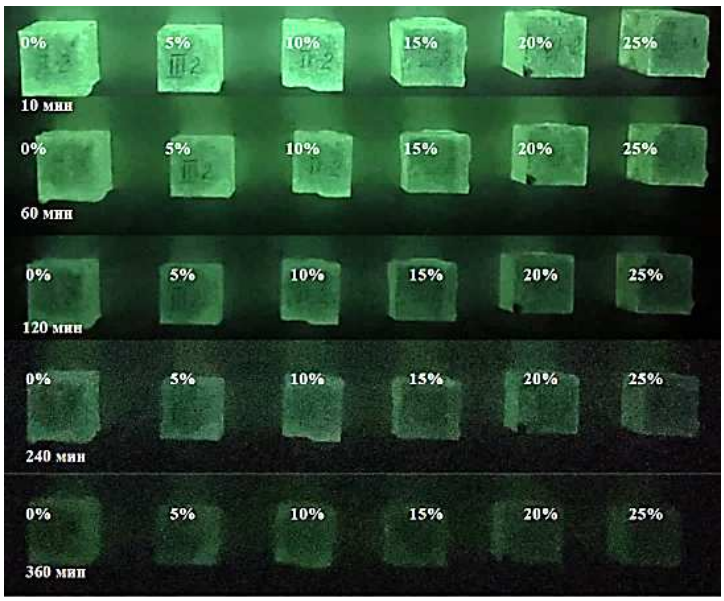


Рисунок 1 – Послесвечение образцов светящегося бетона с различным содержанием светоотражающего компонента после прекращения светового возбуждения

Зависимость яркости послесвечения светящегося бетона от времени при различном содержании светоотражающего компонента представлена на рисунке 2.

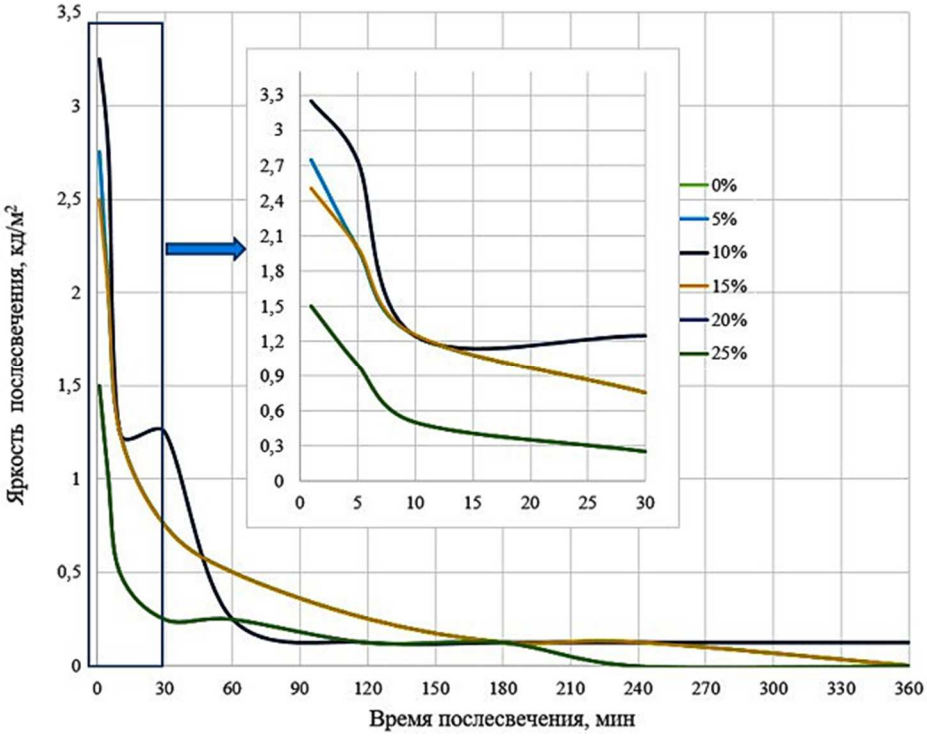


Рисунок 2 – Зависимость яркости послесвечения светящегося бетона от времени при различном содержании светоотражающего компонента

Образец с содержанием светоотражающего компонента 10 % показал максимальное значение яркости – 3,25 кд/м^2, время послесвечения достигает более 6 часов. Начальная яркость образцов с содержанием светоотражающего компонента 0 % и 5 % показала идентичные значения яркости и времени послесвечения, начальная яркость достигает 2,75 кд/м^2, время послесвечения составляет 5 часов. Минимальные начальные значения яркости для образцов с содержанием светоотражающего компонента 25 % и 20 % составляют 1,5 кд/м^2, время послесвечения – 4 часа.

Таким образом, оптимальное содержание светоотражающего компонента в образцах светящегося бетона составляет 10 %. При таком содержании обеспечивается наиболее эффективное отражение света. Благодаря этому компонент усиливает свечение фотолюминесцентного пигмента. Это особенно полезно в условиях низкой освещенности, когда без дополнительного отражения пигмент может быть менее заметен.

Наиболее эффективным по совокупности измеренных показателей является состав с содержанием светоотражающего компонента 10 %: начальная яркость составила 3,25 кд/м^2, а время послесвечения превысило 6 часов. Образцы без добавки и с содержанием 5 % показали идентичные значения яркости – 2,75 кд/м2 и время послесвечения 5 часов. При увеличении содержания светоотражающего компонента до 20 % и 25 % наблюдалось снижение начальной яркости до 1,5 кд/м^2 и сокращение времени послесвечения до 4 часов.

Проведенные исследования показали, что введение светоотражающего компонента оказывает существенное влияние показатели начальной яркости и длительности послесвечения светящегося бетона.

Литература

1. Современное состояние производства и применения светящихся бетонов в строительстве / Л.А. Сулейманова [и др.] // Университетская наука. – 2023. – № 2(16). – С. 62–64.
2. Патент № 2776797 C1 Российская Федерация, МПК B28B 11/24, B28B 11/08, B28B 1/087. способ изготовления изделий из декоративного бетона: № 2021116091: заявл. 03.06.2021: опубл. 26.07.2022 / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, И.С. Рябчевский, А.А. Корякина; заявитель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».
3. Формирование пространственной среды с учетом колористики / Л.А. Сулейманова [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 10. – С. 62–66.
4. Сулейманова Л.А. Исследование фотолюминесцентного пигмента для применения в светящемся архитектурно-декоративном бетоне / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, А.А. Корякина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 6. – С. 8–18.
5. Сулейманова Л.А. Послесвечение бетона с люминесцентным компонентном / Л.А. Сулейманова, Н.П. Лукутцова, Д.Э. Кравченко // В сб.: Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения). Сборник докладов Международной научно-практической конференции. – Белгород, 2023. – С. 205–208.
6. Сулейманова Л.А. Бетон с фотолюминесцентными свойствами / Л.А. Сулейманова, А.А. Корякина. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – 162 с.
7. Сулейманова Л.А. Послесвечение элементов мощения на основе бетона с фотолюминесцентным пигментом / Л.А. Сулейманова, А.А. Корякина, Д.Э. Левшина // В сб.: Наука и инновации в строительстве. Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. – Белгород, 2023. – С. 225–229.
8. Корякина А.А. Способы введения фотолюминесцентного пигмента в изделия из архитектурно-декоративного бетона / А.А. Корякина, Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова // В сборнике: Наука и инновации в строительстве. Сборник докладов V Международной научно-практической конференции. – Белгород, 2021. – С. 170–175.
9. Кравченко Д.Э. Влияние цвета и источника заряда люминесцентного пигмента на свойства светящихся бетонов / Д.Э. Кравченко, Л.А. Сулейманова, Н.П. Лукутцова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 10. – С. 35–43.
10. Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород / Л.А. Сулейманова [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2020. – № 12. – С. 8–16.
11. Сулейманова Л.А. Светящиеся декоративные бетоны с использованием отходов камнедробления горных пород / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, А.А. Корякина // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 115 с.
12. Сулейманова Л.А. К вопросу о разработке единой методики по оценке декоративности бетона / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, А.А. Корякина // В сборнике: Инновации в строи-

тельстве. Материалы международной научно-практической конференции (к 90-летию БГИТУ). – 2019. – С. 120–125.
13. Сулейманова Л.А. Декоративные бетоны в архитектурной геонике / Л.А. Сулейманова, М.В. Малюкова, А.А. Корякина // В сборнике: Природоподобные технологии строительных композитов для защиты среды обитания человека. II Международный онлайн-конгресс, посвященный 30-летию кафедры Строительного материаловедения, изделий и конструкций. – Белгород, 2019. – С. 57–61.

References

1. Current State of Production and Application of Luminous Concrete in Construction / L.A. Suleymanova [et al.] // University Science. – 2023. – № 2(16). – P. 62–64.
2. Patent No. 2776797 C1, Russian Federation, IPC B28B 11/24, B28B 11/08, B28B 1/087. Method for Manufacturing Decorative Concrete Products: No. 2021116091: filed June 3, 2021: published July 26, 2022 / L.A. Suleymanova, M.V. Malyukova, I.S. Ryabchevsky, A.A. Koryakina; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov».
3. Formation of the spatial environment taking into account coloristics / L.A. Suleymanova [et al.] // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2016. – № 10. – P. 62–66.
4. Suleymanova L.A. Research into photoluminescent pigment for use in luminous architectural and decorative concrete / L.A. Suleymanova, M.V. Malyukova, A.A. Koryakina // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2021. – № 6. – P. 8–18.
5. Suleymanova L.A. Afterglow of concrete with a luminescent component / L.A. Suleymanova, N.P. Lukutsova, D.E. Kravchenko // In the collection: Science-intensive technologies and innovations (XXV Scientific Readings). Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference. – Belgorod, 2023. – P. 205–208.
6. Suleymanova L.A. Concrete with photoluminescent properties / L.A. Suleymanova, A.A. Koryakina. – Belgorod : Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2022. – 162 p.
7. Suleymanova L.A. Afterglow of paving elements based on concrete with a photoluminescent pigment / L.A. Suleymanova, A.A. Koryakina, D.E. Levshina // In: Science and Innovations in Construction. Collection of reports of the VII International Scientific and Practical Conference dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhov. – Belgorod, 2023. – P. 225–229.
8. Koryakina A.A. Methods for introducing photoluminescent pigment into products made of architectural and decorative concrete / A.A. Koryakina, L.A. Suleymanova, M.V. Malyukova // In the collection: Science and Innovation in Construction. Collection of reports of the V International Scientific and Practical Conference. – Belgorod, 2021. – P. 170–175.
9. Kravchenko D.E. The influence of the color and charge source of a fluorescent pigment on the properties of luminous concretes / D.E. Kravchenko, L.A. Suleymanova, N.P. Lukutsova // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2024. – № 10. – P. 35–43.
10. Luminous decorative concretes using waste from rock crushing / L.A. Suleymanova [et al.] // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2020. – № 12. – P. 8–16.
11. Suleymanova L.A. Glowing decorative concretes using waste from rock crushing / L.A. Suleymanova, M.V. Malyukova, A.A. Koryakina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 115 p.
12. Suleymanova L.A. On the issue of developing a unified methodology for assessing the decorative properties of concrete / L.A. Suleymanova, M.V. Malyukova, A.A. Koryakina // In the collection: Innovations in Construction. Materials of the International Scientific and Practical Conference (dedicated to the 90th anniversary of BGITU). – 2019. – P. 120–125.
13. Suleymanova L.A. Decorative concretes in architectural geonics / L.A. Suleymanova, M.V. Malyukova, A.A. Koryakina // In the collection: Nature-inspired technologies of building composites for protecting the human environment. II International online congress dedicated to the 30th anniversary of the Department of Construction Materials Science, Products and Structures. – Belgorod, 2019. – P. 57–61.

УДК 666.973.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА КЛАДОЧНОГО ШВА НА ПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ БЛОКОВ

♦♦♦♦♦

STUDY OF THE EFFECT OF MORTAR JOINT MATERIAL ON THE WATER VAPOR PERMEABILITY OF BUILDING ENVELOPES MADE OF AERATED CONCRETE BLOCKS

Сулейманова Людмила Александровна
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой строительства
и городского хозяйства,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова

Рябчевский Игорь Сергеевич
кандидат технических наук,
доцент кафедры строительства и городского хозяйства,
Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»
kloud09@mail.ru

Се Ди
исследователь кафедры строительства
и городского хозяйства,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»
1332689363@qq.com

Suleymanova Lyudmila Alexandrovna
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Head of the Department
of Construction and Municipal Services
Belgorod State Technological University
named After V.G. Shukhov

Ryabchevskiy Igor Sergeyevich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Department
of Construction and Municipal Services,
Belgorod State Technological University
named After V.G. Shukhov
kloud09@mail.ru

Se Di
Researcher, Department of Construction
and Municipal Services,
Belgorod State Technological University
named After V.G. Shukhov
1332689363@qq.com

Аннотация. Наружные стены из ячеистобетонных блоков являются неоднородными ограждающими конструкциями, в состав которых наряду с основным материалом входят кладочные швы. Материал и структура шва способны оказывать влияние не только на прочность и теплотехническую однородность кладки, но и на перенос водяного пара. В работе представлены результаты экспериментального определения паропроницаемости модельных образцов, характеризующих три участка ограждающей конструкции: ячеистый бетон без кладочного материала, ячеистый бетон в сочетании с цементным раствором и ячеистый бетон в сочетании с полиуретановым клеем. Исследования выполнены методом создания стационарного потока водяного пара при температуре воздуха 20 °С и относительной влажности 60 %. Установлено, что применение цементного раствора сопровождалось уменьшением среднего значения на 3,5 %, что находится в пределах относительной погрешности примененного метода. При использовании полиуретанового клея паропроницаемость снизилась на 51,1 % относительно контрольной серии. Полученные результаты свидетельствуют о существенном локальном влиянии полиуретанового кладочного материала на сопротивление паропроницанию водяного пара.

Ключевые слова: ячеистобетонные блоки, ограждающая конструкция, кладочный шов, цементный раствор, полиуретановый клей, паропроницаемость.

Annotation. External walls made of aerated concrete blocks are non-homogeneous envelope structures comprising both the primary material and masonry joints. The material and structure of the joint can influence not only the strength and thermal homogeneity of the masonry but also water vapor transport. This paper presents the results of an experimental determination of water vapor permeability for model specimens representing three sections of the envelope structure: aerated concrete without masonry material, aerated concrete combined with cement mortar, and aerated concrete combined with polyurethane adhesive. The tests were conducted by establishing a steady-state water vapor flow at an air temperature of 20 °C and a relative humidity of 60 %. It was found that the use of cement mortar resulted in a 3.5 % decrease in the mean value, a figure falling within the relative error margin of the method employed. With the use of polyurethane adhesive, water vapor permeability decreased by 51.1 % compared to the control series. The results indicate a significant local effect of the polyurethane masonry material on water vapor diffusion resistance.

Keywords: aerated concrete blocks, envelope structure, masonry joint, cement mortar, polyurethane adhesive, water vapor permeability.

Введение. Обеспечение требуемого температурно-влажностного режима наружных ограждающих конструкций является одним из условий сохранения их теплозащит-

ных свойств и эксплуатационной надежности. Для стен из ячеистобетонных блоков этот вопрос имеет особое значение, поскольку пористая структура материала определяет возможность переноса влаги как в жидкой, так и в парообразной фазе, что отражается на теплотехнических характеристиках ячеистого бетона [1, 2].

В соответствии с действующими нормативными требованиями блоки из ячеистого бетона применяют в качестве несущих и самонесущих элементов наружных и внутренних стен и перегородок. При эксплуатации наружных ограждений во влажном и мокром режимах должна быть предусмотрена защита изделий от переувлажнения, а паропроницаемость блоков характеризуется коэффициентом паропроницаемости примененного ячеистого бетона, определяемым по ГОСТ 25898. Вместе с тем фактическая стена представляет собой не сплошной массив ячеистого бетона, а кладочную систему, в которой блоки объединены горизонтальными и вертикальными швами.

Кладочный шов определяется как слой раствора либо клеевого состава, связывающий изделия в каменной кладке. В традиционной технологии соединение ячеистобетонных блоков выполняют цементосодержащими растворами и сухими клеевыми смесями. Альтернативным решением являются однокомпонентные полиуретановые клеи, позволяющие формировать тонкий шов и исключать операции, связанные с приготовлением водного раствора. Возможность использования полиуретановых составов в ячеистобетонной кладке подтверждается исследованиями ее прочности, деформативности и трещиностойкости [3–5].

Большинство выполненных исследований посвящено механической работе кладки и влиянию швов на ее теплотехническую однородность. Показано, что толщина и материал шва изменяют напряженно-деформированное состояние контактной зоны, а применение полиуретанового клея позволяет уменьшить теплопроводные включения в стене [6–8]. При этом влияние материала кладочного шва на перенос водяного пара изучено в меньшей степени. Между тем результаты исследований других видов кладочных систем показывают, что растворные швы, контактные зоны, неполное заполнение и микротрещины способны изменять сопротивление паропроницанию композитного слоя по сравнению с основным материалом [9, 10].

Таким образом, при оценке влажностного режима стены недостаточно рассматривать только табличный коэффициент паропроницаемости ячеистого бетона. Необходимо учитывать свойства материалов кладочных швов и характер их взаимодействия с блоками.

В связи с чем целью исследования является экспериментальная оценка влияния цементного раствора и полиуретанового клея, применяемых в качестве материалов кладочного шва, на паропроницаемость модельных образцов ограждающих конструкций из ячеистобетонных блоков. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определение паропроницаемости ячеистого бетона без кладочного материала; определение паропроницаемости образцов с цементным раствором и полиуретановым клеем; сопоставление средних значений трех серий; оценка изменения сопротивления переносу водяного пара в зависимости от вида материала кладочного шва.

Материалы и методы. В качестве основы экспериментальных образцов использовали образцы автоклавного газобетона марки по средней плотности D500. Для моделирования участков кладки были приняты два типа соединительного материала: цементный раствор и полиуретановый клей. Всего изготовлено и испытано девять образцов, разделенных на три серии по три образца. Схема эксперимента приведена в таблице 1. При этом изготовленные образцы не воспроизводят геометрическую долю швов во фрагменте стены, поэтому полученные значения характеризуют исследованные локальные зоны, а не приведенную паропроницаемость ограждающей конструкции в целом.

Таблица 1 – Состав экспериментальных серий

Серия	Номера образцов	Состав образца	Назначение серии
I	1–3	Ячеистый бетон	Контрольная серия, моделирующая участок блока вне шва
II	4–6	Ячеистый бетон и цементный раствор	Модель локальной зоны цементного кладочного шва
III	7–9	Ячеистый бетон и полиуретановый клей	Модель локальной зоны полиуретанового кладочного шва

Испытания проводились в соответствии с принципом метода, установленным ГОСТ 25898-2020 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию». Сущность метода заключается в создании стационарного потока водяного пара через образец и последующем определении плотности этого потока.

Средняя температура воздуха в камере составляла 20 °С, относительная влажность – 60 %, давление насыщенного водяного пара под образцом – 2338 Па, парциальное давление водяного пара в камере – 1402 Па, разность парциальных давлений – 936 Па.

Обработку результатов выполняли отдельно для каждой серии. Определяли среднее арифметическое, стандартное отклонение, коэффициент вариации и относительное изменение среднего значения по сравнению с контрольной серией.

Результаты и обсуждения. Результаты определения коэффициента паропроницаемости отдельных образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения паропроницаемости образцов

Номер образца	Плотность потока водяного пара, мг/(м^2·ч)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Среднее значение, мг/(м·ч·Па)	Стандартное отклонение, мг/(м·ч·Па)	Коэффициент вариации, %	Изменение к контролю, %
1	115	0,45	0,470	0,017	3,7	–
2	140	0,48				
3	140	0,48				
4	107	0,45	0,453	0,006	1,3	–3,5
5	107	0,45				
6	115	0,46				
7	65	0,23	0,230	0,010	4,3	–51,1
8	49	0,22				
9	74	0,24				

Результаты исследования показывают, что введение цементного раствора практически не изменило измеряемую характеристику по сравнению с исходным ячеистым бетоном. Полученное различие 3,5 % меньше установленной для метода относительной погрешности 10 %. Иная закономерность установлена для полиуретанового клея. Во всех трех образцах третьей серии значения паропроницаемости были приблизительно в два раза меньше, чем в контрольной и цементно-растворной сериях. С учетом обратно пропорциональной зависимости между коэффициентом паропроницаемости и сопротивлением паропроницанию при одинаковой толщине уменьшение коэффициента с 0,470 до 0,230 мг/(м·ч·Па) соответствует увеличению сопротивления исследованной зоны примерно в 2,04 раза.

Полученный результат обусловлен особенностями структуры отвержденного полиуретанового материала. В отличие от минерального раствора, имеющего капиллярно-пористую структуру, полиуретановый клей формирует полимерную контактную прослойку и частично заполняет поверхностные поры ячеистого бетона. При этом степень влияния зависит от фактической толщины клея, ширины полос нанесения, сплошности шва и структуры контактной зоны. Поэтому установленное снижение следует относить к испытанной конфигурации образцов, не распространяя численное значение автоматически на все полиуретановые кладочные системы.

Полученные данные подтверждают необходимость рассматривать кладку из ячеистобетонных блоков как неоднородную систему. Коэффициент паропроницаемости блока характеризует свойства основного материала, однако в реальной стене поток водяного пара проходит также через горизонтальные и вертикальные швы. В зависимости от паропроницаемости соединительного материала, площади швов, их ориентации и качества заполнения швы могут выступать как зоны повышенного либо пониженного сопротивления. Исследования композитных кладочных слоев показывают, что контактные нарушения и неполное заполнение швов способны превращать их в преимущественные пути переноса пара и воздуха, даже если сам раствор обладает большим диффузионным сопротивлением.

Выводы. В результате проведенного исследования получены следующие выводы.

Экспериментально определена паропроницаемость трех типов модельных образцов: ячеистого бетона без кладочного материала, ячеистого бетона с цементным раствором и ячеистого бетона с полиуретановым клеем. Средняя паропроницаемость контрольной серии составила 0,470 мг/(м·ч·Па). Для серии с цементным раствором получено среднее значение 0,453 мг/(м·ч·Па), что на 3,5 % ниже контрольного. Средняя паропроницаемость образцов с полиуретановым клеем составила 0,230 мг/(м·ч·Па).

Установлено, что при одинаковой толщине образцов применение полиуретанового клея соответствует увеличению локального сопротивления паропроницанию примерно в 2,04 раза по отношению к ячеистому бетону без кладочного материала. Следовательно, материал кладочного шва может существенно влиять на перенос водяного пара через локальные участки ограждающей конструкции.

В дальнейших исследованиях целесообразно установить влияние толщины и сплошности шва, исследовать несколько температурно-влажностных режимов и выполнить сопоставление результатов с расчетной моделью переноса влаги через ограждающую конструкцию из ячеистобетонных блоков.

Литература

1. Эксплуатационная влажность автоклавного газобетона в стеновых конструкциях / С.В. Корниенко [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2018. – № 8(71). – С. 22–40.
2. Взаимосвязанный тепло- и массоперенос в наружной стене из газобетона со слоями штукатурного раствора на ее поверхностях / Н.А. Цветков [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – Т. 27. – № 3. – С. 208–219.
3. Особенности применения полиуретанового клея в кладке из ячеистобетонных блоков / Л.А. Сулейманова [и др.] // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. – Т. 2. – С. 126–130.
4. Сулейманова Л.А. Заполнение швов ячеистобетонной кладки несущих и самонесущих стен зданий / Л.А. Сулейманова, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский // Университетская наука. – 2019. – № 2(8). – С. 33–36.
5. Сулейманова Л.А. Физико-механические характеристики ячеистобетонной кладки с различным выполнением швов / Л.А. Сулейманова, Д. Се, И.С. Рябчевский // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов V Международной научно-практической конференции : в 2-х т. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – Т. 2. – С. 213–218.
6. Сулейманов К.А. Повышение теплотехнической однородности стен из ячеистобетонных блоков / К.А. Сулейманов, И.А. Погорелова, И.С. Рябчевский // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 5. – С. 17–24. – DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-5-17-24. – EDN FNJKKH
7. Сулейманова Л.А. Сопротивление кладки из ячеистобетонных блоков на полиуретановом клее центральному сжатию / Л.А. Сулейманова, С.М. Есипов, Д. Се // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 7. – С. 35–42.
8. Сулейманова Л.А. Исследование прочности при изгибе образцов кладки из ячеистобетонных блоков / Л.А. Сулейманова, А.В. Иванчиков, Д. Се // Наука и инновации в строительстве: Сборник докладов IX Международной научно-практической конференции. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2025. – С. 77–81.
9. Hens H.S.L.C. The vapor diffusion resistance and air permeance of masonry and roofing systems // Building and Environment. – 2006. – Vol. 41(6). – P. 745–755.
10. Горшков А.С. Инновационная технология возведения стеновых конструкций из газобетонных блоков на полиуретановый клей / А.С. Горшков, Н.И. Ватин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2013. – № 8(13). – С. 20–28.

References

1. Operational moisture content of autoclaved aerated concrete in wall structures / S.V. Kornienko [et al.] // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2018. – № 8(71). – P. 22–40.
2. Coupled heat and mass transfer in an aerated concrete exterior wall with plaster layers on its surfaces / N.A. Tsvetkov [et al.] // Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. – 2025. – Vol. 27. – № 3. – P. 208–219.
3. Specifics of using polyurethane adhesive in aerated concrete block masonry / L.A. Suleymanova [et al.] // Science and Innovation in Construction: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 170th Anniversary of V.G. Shukhov. – Belgorod : V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2023. – Vol. 2. – P. 126–130.
4. Suleymanova L.A. Filling of joints in aerated concrete masonry for load-bearing and self-supporting building walls / L.A. Suleymanova, I.A. Pogorelova, I.S. Ryabchevsky // University Science. – 2019. – № 2(8). – P. 33–36.
5. Suleymanova L.A. Physico-mechanical characteristics of aerated concrete masonry with various joint configurations / L.A. Suleymanova, D. Xie, I.S. Ryabchevsky // Science and Innovation in Construction: Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference : in 2 vol. – Belgorod : V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2021. – Vol. 2. – P. 213–218.
6. Suleymanov K.A. Improving the thermal uniformity of walls made of aerated concrete blocks / K.A. Suleymanov, I.A. Pogorelova, I.S. Ryabchevsky // Bulletin of V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. – 2022. – № 5. – P. 17–24. DOI 10.34031/2071-7318-2022-7-5-17-24 EDN FNJKKH

7. Suleymanova L.A. Resistance of aerated concrete block masonry bonded with polyurethane adhesive to axial compression / L.A. Suleymanova, S.M. Esipov, D. Xie // Bulletin of V.G. Shukhov Belgorod State Technological University. – 2024. – № 7. – P. 35–42.
8. Suleymanova L.A. Investigation of the flexural strength of masonry specimens made of aerated concrete blocks / L.A. Suleymanova, A.V. Ivanchikov, D. Se // Science and Innovation in Construction: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference. – Belgorod : V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2025. – P. 77–81.
9. Hens H.S.L.C. The vapor diffusion resistance and air permeance of masonry and roofing systems // Building and Environment. – 2006. – Vol. 41(6). – P. 745–755.
10. Gorshkov A.S. Innovative technology for constructing wall structures from aerated concrete blocks using polyurethane adhesive / A.S. Gorshkov, N.I. Vatin // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2013. – № 8(13). – P. 20–28.

УДК 697.1

АНАЛИЗ РАСХОЖДЕНИЙ ПРОЕКТНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ

♦♦♦♦♦

ANALYSIS OF DISCREPANCIES BETWEEN DESIGN AND ACTUAL THERMAL PROTECTION PERFORMANCE INDICATORS OF BUILDING ENVELOPE STRUCTURES IN OPERATIONAL BUILDINGS

Тарарыкин Дмитрий Владимирович
аспирант кафедры строительства,
Юго-Западный государственный университет (ЮЗГУ)
tararykin.di@gmail.com

Аннотация. В статье выполнен анализ причин расхождений между проектными и фактическими показателями теплозащиты ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий. Рассмотрены этапы изменений нормативных требований к тепловой защите в Российской Федерации с 2004 г. по настоящее время, включая актуализированную редакцию СП 50.13330.2024. Систематизированы конструктивно-технологические решения наружного утепления и теплоизоляционные материалы. Фактические и проектные значения по результатам сравнений значительно расходятся. К примеру, учёт теплопроводных включений, увлажнение материалов во время эксплуатации, изменения свойств материалов. Проведён анализ нормативных материалов и публикаций, которые показывают недостаточную осведомленность в теме фактических исследований по данному направлению. Сформулированы нерешённые проблемы, поясняющие необходимость разработки методов повышения достоверности проектных решений и контроля фактических показателей теплозащиты.

Ключевые слова: теплозащита зданий, ограждающие конструкции, приведенное сопротивление теплопередаче, проектные и фактические показатели, теплопроводные включения, коэффициент теплотехнической однородности, натурные обследования.

Tararykin Dmitry Vladimirovich
Postgraduate Student
at the Department of Construction,
Southwestern State University
tararykin.di@gmail.com

Annotation.
The article analyzes the reasons for the discrepancies between the design and actual thermal performance indicators of the enclosing structures of buildings in operation. The stages of changes in the regulatory requirements for thermal protection in the Russian Federation from 2004 to the present are examined, including the updated version of SP 50.13330.2024. The structural and technological solutions for external insulation and thermal insulation materials have been systematized. The actual and design values differ significantly based on the comparison results. For example, this may be due to the consideration of thermal conductive inclusions, the moisture content of materials during operation, and changes in the properties of the materials. An analysis of regulatory materials and publications has been carried out, revealing insufficient awareness of the topic of actual research in this area. Unresolved problems have been identified, explaining the need to develop methods for improving the reliability of design solutions and monitoring the actual thermal protection performance.

Keywords: Thermal insulation of buildings, enclosing structures, reduced heat transfer resistance, design and actual indicators, thermal conductive inclusions, coefficient of thermal uniformity, field surveys.

Введение

Проблема энергосбережения в строительном комплексе Российской Федерации остаётся одной из приоритетных в свете реализации Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» и последовательного ужесточения требований к теплозащите зданий. Актуализированная редакция СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» [1] устанавливает повышенные требования к приведенному сопротивлению теплопередаче ограждающих конструкций, удельной теплозащитной характеристике здания, ограничению минимальной температуры и недопущению конденсации влаги на внутренних поверхностях.

Однако, как показывают результаты натурных обследований, фактические показатели теплозащиты эксплуатируемых зданий зачастую существенно ниже проектных значений. В монографии П.А. Трубаева (2024) [2] обобщены результаты инструментальных измерений на зданиях различного назначения для временного длительного и постоянного пребывания в помещениях (учебные заведения, жилые дома, административные здания), которые демонстрируют систематическое занижение фактического сопротивления теплопередаче на 20–40 % по сравнению с проектными величинами. Это противоречие между требуемым и фактическим уровнями теплозащиты приводит к перерасходу тепловой энергии на отопление, дискомфортным

условиям проживания, а в ряде случаев – к преждевременному разрушению ограждающих конструкций из-за промерзания и увлажнения.

Объектом настоящего исследования являются системы теплозащиты ограждающих конструкций эксплуатируемых зданий, предметом – причины и количественные характеристики расхождений между проектными и фактическими показателями теплозащиты.

Эволюция нормативной базы и методов расчёта

Ретроспективный анализ изменения нормативных требований к уровню теплозащиты ограждающих конструкций свидетельствует о последовательном ужесточении подхода к нормированию. В СНиП II 3 79* «Строительная теплотехника» требуемое сопротивление теплопередаче наружных стен для центральных регионов составляло около 2,0–2,5 (м²·°С)/Вт. С введением СНиП 23 02 2003 «Тепловая защита зданий» произошёл переход к нормированию, дифференцированному по величине градусо суток отопительного периода (ГСОП). Для условий г. Курска (ГСОП ≈5000 °С·сут) нормируемое значение сопротивления теплопередаче стен было установлено на уровне 3,5 (м²·°С)/Вт. Актуализированная редакция СП 50.13330.2024 [1] сохранила этот принцип, но ввела дополнительные требования к расчёту приведенного сопротивления теплопередаче фрагментов с учётом температурных полей.

Фундаментальный вклад в развитие теоретических основ строительной теплофизики внесли работы Ю.А. Табунщикова [3], В.Г. Гагарина [4], В.К. Савина [5], выполненные в период 2004–2011 гг. В них были сформулированы принципы расчёта нестационарного теплопереноса, учёта тепловой инерции ограждающих конструкций и совместного влаго и теплопереноса. Данные принципы моделируют изменения температуры внутри конструкции и тепловых потоков во времени из-за колебаний таких факторов, как мороз, солнечная радиация, высокие температуры. Исходя из этого пошагово были выведены расчёты температурных полей и тепловых потоков, учитывая всевозможные неоднородности. В.Г. Гагариным и В.В. Козловым [6] подробно проанализированы требования к теплозащите и энергетической эффективности, обоснована необходимость трёхуровневой системы нормирования.

Однако, как отмечается в [4, 7], существующие способы утепления и теплозащиты, базирующиеся на стационарных условиях теплопередачи и осреднённых характеристиках материалов, не всегда адекватно описывают реальную работу многослойных конструкций. Наличие крепёжных элементов, стыков панелей, оконных откосов приводит к образованию мостиков холода, снижающих фактическое сопротивление теплопередаче на 15–30 % по сравнению с расчётным для однородной части стены. Для учёта этого эффекта вводят коэффициент теплотехнической однородности *r*, низкое значение которого указывает на неэффективное использование теплоизоляционных материалов. В свою очередь это может привести к повышенным теплопотерям, нарушению комфортно-влажностного режима и образованию конденсата. Методика определения значения данного коэффициента для современных фасадных систем остаётся предметом дискуссий [8].

Классификация и анализ современных конструктивно-технологических решений теплозащиты

Современные системы наружного утепления зданий могут быть классифицированы по способу расположения изоляции и типу наружной отделки. В таблице 1 представлены основные типы систем с их достоинствами и недостатками.

Таблица 1 – Сравнительный анализ систем наружного утепления

Тип системы	Конструктивное решение	Достоинства	Недостатки	Последствия возможных расхождения
1	2	3	4	5
Системы с тонким штукатурным слоем (СФТК)	Утеплитель приклеивается к стене, крепится дюбелями, армируется сеткой, оштукатуривается	Отсутствие сквозных металлических элементов, относительно невысокая стоимость, широкие архитектурные возможности	Высокие требования к качеству монтажа, сложность ремонта, риск накопления влаги	Нарушение технологии приводит к мостикам холода в стыках плит, увлажнению утеплителя
Навесные вентилируемые фасады (НВФ)	Утеплитель крепится к стене, защищается мембраной, облицовка монтируется на металлокаркасе с воздушным зазором	Высокая долговечность, ремонтопригодность, применение любого утеплителя, избавление от влаги	Высокая стоимость, мощные теплопроводные включения (кронштейны), сложность узлов	Теплопотери через кронштейны могут достигать 20-25% от общего потока

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5
Системы с внутренним утеплением	Утеплитель размещается с внутренней стороны стены, закрывается пароизоляцией и гипсокартоном	Возможность утепления при сохранении фасада, независимость от погодных условий при монтаже	Уменьшение площади помещений, риск конденсации влаги, необходимость тщательной пароизоляции	Нарушение пароизоляции приводит к увлажнению и резкому снижению теплозащиты
Трёхслойные конструкции с утеплителем внутри	Утеплитель закладывается между несущим и облицовочным слоями (кирпич, блоки) или в сэндвич-панели	Защита утеплителя от внешних воздействий, хорошая звукоизоляция, высокая прочность	Мостики холода через гибкие связи, сложность контроля качества утепления в процессе строительства	Неучтённые потери через связи, неравномерное заполнение утеплителем

Современные теплоизоляционные материалы также вносят свой вклад в расхождение проектных и фактических показателей. В таблице 2 приведён анализ влияния свойств материалов на возможные отклонения.

Таблица 2 – Влияние свойств теплоизоляционных материалов на расхождение показателей

Материал	Теплопроводность λ, Вт/(м·°C)	Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	Основные причины расхождений
Минеральная вата	0,035–0,045	0,3–0,5	Увлажнение (рост λ на 3–5 % на 1 % увлажнения), усадка, выдувание волокон
Пенополистирол (ПСБ-С)	0,031–0,041	0,02–0,05	Деструкция под УФ, деформации при нагреве, повреждение грызунами
Экструдированный пенополистирол (XPS)	0,028–0,034	0,005–0,013	Нарушение примыканий, диффузия газа, старение
Пенополиизоцианурат (PIR)	0,022–0,027	0,001–0,005	Деградация облицовки, усадка сердцевины
Вакуумные изоляционные панели (VIP)	0,004–0,008	практически 0	Потеря вакуума при повреждении оболочки, сложность герметизации стыков
Аэрогели	0,012–0,020	0,01–0,03	Высокая стоимость ограничивает применение, недостаточно данных о долговечности

Заключение

Выполненный анализ современного состояния проблемы расхождений проектных и фактических показателей теплозащиты ограждающих конструкций подтвердил её высокую актуальность. Показано, что, несмотря на ужесточение нормативных требований и появление новых эффективных материалов, существует устойчивый разрыв между проектными и фактическими показателями, достигающий 20–50%. Основными причинами являются: недостаточный учёт теплопроводных включений (снижение *r* до 0,5–0,8), увлажнение материалов (рост λ на 3–5 % на 1 % увлажнения), низкое качество монтажных работ (до 30 % дополнительных теплопотерь), деградация свойств в течение эксплуатации здания.

Систематизированы конструктивные решения и материалы с точки зрения их влияния на возможные расхождения. Наукометрический анализ показал, что тема натурных исследований и подтверждения проектных показателей представлена в научной литературе недостаточно по сравнению с разработкой новых материалов, особенно в отечественных публикациях.

Сформулированные противоречия доказывают необходимость разработки метода для более оптимального применения теплоизоляционных материалов, учитывающего не только нормативные требования, но и реальные условия эксплуатации, качество монтажа, климатические факторы и долговечность.

Для продолжения тематики этого исследования автор ставит перед собой некоторые задачи.

1. Проведение натурных теплотехнических обследований типовых зданий различного периода постройки в Курской области с использованием тепловизионной съёмки и градиентометрии.

2. Численное моделирование температурных полей в характерных узлах примыканий для различных конструктивных решений и оценка фактических коэффициентов теплотехниче-

ской однородности, разрешение возникающих разногласий в вопросе применения коэффициента в различных условиях.

3. Лабораторные исследования кинетики увлажнения и деградации теплоизоляционных материалов при циклических климатических воздействиях.

4. Разработку методики прогнозирования фактических показателей теплозащиты на стадии проектирования с учётом региональных факторов.

5. Создание алгоритма выбора оптимального теплоизоляционного материала и конструктивного решения, минимизирующего расхождение проектных и фактических показателей.

Литература

1. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М. : Минстрой России, 2024. – 112 с.
2. Трубаев П.А. Анализ и повышение энергоэффективности при проектировании и эксплуатации зданий и систем теплоснабжения. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2024. – 311 с.
3. Табунщиков Ю.А. Основы математического моделирования теплового режима здания как единой теплоэнергетической системы // АВОК. – 2004. – № 5. – С. 12–18.
4. Гагарин В.Г. Теплофизические проблемы современных стеновых ограждающих конструкций многоэтажных зданий // Academia. Архитектура и строительство. – 2009. – № 5. – С. 297–305.
5. Савин В.К. Строительная физика. Энергоэкономика. – М. : Лазурь, 2011. – 416 с.
6. Гагарин В.Г. Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов // Жилищное строительство. – 2011. – № 8. – С. 2–5.
7. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий / К.Ф. Фокин; Под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. – 5-е изд., пересмотр. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
8. Козлов В.В. Аналитический метод расчета движения воздуха в воздушном зазоре вентилируемого фасада с облицовкой, содержащей периодические разрывы. // В кн. Строительная физика в XXI веке. Научно-техническая конференция, посвященная 50-летию НИИСФ РААСН. Москва, НИИСФ, 25–27 сентября 2006 г. – С. 65–72.
9. Фасадные теплоизоляционные системы с воздушным зазором. Рекомендации по составу и содержанию документов и материалов, представляемых для технической оценки пригодности продукции / В.М. Горпинченко [и др.]. – М. : Госстрой России, 2004. – 58 с.
10. Ahmad A. In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of building envelopes / A. Ahmad, M. Maslehuddin, L.M. Al-Hadhrami // Energy and Buildings. – 2014. – Vol. 84. – P. 132–141.
11. Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries: A comparison of the heat flow meter and the thermometric methods / F. Asdrubali [et al.] // Energy and Buildings. – 2020. – Vol. 226. – 110374 p.
12. Башмаков И.А. Фактическое энергопотребление зданий: анализ причин отклонений от проектных показателей // Энергосбережение. – 2021. – № 3. – С. 25–31.
13. Гагарин В.Г. Теплозащита фасадов с вентилируемым воздушным зазором / В.Г. Гагарин, В.В. Козлов, Е.Ю. Цыкановский // АВОК. – 2004. – № 3. – С. 20–26.
14. Горшков Л.С. Сравнительный анализ потерь тепловой энергий через наружные ограждающие конструкции в зависимости от минимальных требований к уровню теплоизоляции наружных ограждающих конструкций здания / Л.С. Горшков, Д.В. Немова, П.П. Рымкевич // Кровельные и изоляционные материалы. – 2013. – № 1 – С. 24–30.
15. Simmler H., Brunner S. Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life // Energy and Buildings. – 2005. – Vol. 37. – Iss. 11. – P. 1122–1131.
16. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43. – Iss. 10. – P. 2549–2563.
17. Baetens R. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review / R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43. – Iss. 4. – P. 761–769.
18. Данилова Н.И. Современные методы утепления фасадов зданий и влияние теплоизоляции наружных стен на энергосбережение зданий. Вестник науки. – 2023. – № 4(12). – С. 1441–1447.

References

1. SP 50.13330.2024. Thermal Protection of Buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2024. – 112 p.

2. Trubaev P.A. Analysis and Improvement of Energy Efficiency in the Design and Operation of Buildings and Heat Supply Systems. – Belgorod : BSTU Publishing House, 2024. – 311 p.
3. Tabunshchikov Yu.A. Fundamentals of Mathematical Modeling of the Thermal Regime of a Building as a Unified Thermal-Energy System // AVOK. – 2004. – № 5. – P. 12–18.
4. Gagarin V.G. Thermophysical Issues of Modern Wall Enclosure Structures for High-Rise Buildings // Academia. Architecture and Construction. – 2009. – № 5. – P. 297–305.
5. Savin V.K. Building Physics. Energy Economics. – M. : Lazur, 2011. – 416 p.
6. Gagarin V.G. Requirements for Thermal Protection and Energy Efficiency in the Draft Updated Building Code (SNiP) «Thermal Protection of Buildings» / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov // Housing Construction (Zhilishchnoye Stroitelstvo). – 2011. – № 8. – P. 2–5.
7. Fokin K.F. Building Thermal Engineering of Building Envelopes / K.F. Fokin; Ed. by Yu.A. Tabunshchikov, V.G. Gagarin. – 5th ed., revised. – M. : AVOK-PRESS, 2006. – 256 p.
8. Kozlov V.V. An analytical method for calculating airflow within the air gap of a ventilated facade featuring periodic gaps in the cladding. // In: Building Physics in the 21st Century. Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the NIISF RAASN (Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences). Moscow, NIISF, September 25–27, 2006. – P. 65–72.
9. Facade thermal insulation systems with an air gap: Recommendations on the composition and content of documents and materials to be submitted for the technical assessment of product suitability / V.M. Gorpinchenko [et al.]. – M. : Gosstroy of Russia, 2004. – 58 p.
10. Ahmad A. In situ measurement of thermal transmittance and thermal resistance of building envelopes / A. Ahmad, M. Maslehuddin, L.M. Al-Hadhrami // Energy and Buildings. – 2014. – Vol. 84. – P. 132–141.
11. Evaluating in situ thermal transmittance of green buildings masonries: A comparison of the heat flow meter and the thermometric methods / F. Asdrubali [et al.] // Energy and Buildings. – 2020. – Vol. 226. – 110374 p.
12. Bashmakov I.A. Actual energy consumption of buildings: an analysis of the reasons for deviations from design values // Energosberezhenie (Energy Saving). – 2021. – № 3. – P. 25–31.
13. Gagarin V.G. Thermal protection of facades with a ventilated air gap / V.G. Gagarin, V.V. Kozlov, E.Yu. Tsykanovsky // AVOK. – 2004. – № 3. – P. 20–26.
14. Gorshkov L.S. Comparative analysis of thermal energy losses through external building envelopes in relation to minimum requirements for the thermal insulation level of a building's external envelopes / L.S. Gorshkov, D.V. Nemova, P.P. Rymkevich // Roofing and Insulation Materials. – 2013. – № 1. – P. 24–30.
15. Simmler H. Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life / H. Simmler, S. Brunner // Energy and Buildings. – 2005. – Vol. 37. – Iss. 11. – P. 1122–1131.
16. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43. – Iss. 10. – P. 2549–2563.
17. Baetens R. Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review / R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen // Energy and Buildings. – 2011. – Vol. 43. – Iss. 4. – P. 761–769.

УДК 624.012.45

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ КАК АНТИСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЯСА В КАМЕННОЙ И КИРПИЧНОЙ КЛАДКЕ: ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ

♦♦♦♦♦

THE USAGE OF WOOD AS AN ANTI SEISMIC BELT IN MASONRY AND BRICKWORK: HISTORICAL EXPERIENCE

Томилова Елена Владимировна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
vvyprintseva@yandex.ru

Долгополов Василий Евгеньевич
старший преподаватель,
Кубанский государственный технологический университет
dolgopolov_v@icloud.com

Данько Владислав Павлович
кандидат технических наук,
доцент кафедры,
Кубанский государственный технологический университет
Vladislav.danko@mail.ru

Аннотация. Статья ставит цель изучить историю деревянных антисейсмических поясов, которые веками закладывали в каменную и кирпичную кладку для защиты зданий от землетрясений. Рассматриваются примеры из разных культур и эпох: минойский Крит (Кносский дворец, Акротири, начало II тыс. до н.э.), Древняя Греция, набатейский храм Каср эль-Бинт в Петре (I в. до н. э. – I в. н. э.), османская система хатыл. Отмечается, что деревянные балки в стенах работали как горизонтальные связи: они объединяли кладку в единую деформируемую систему и снижали сдвиговые напряжения на 33–50 %. Эффективность такого решения подтверждают данные по землетрясениям в Турции 1999 года: из 789 традиционных деревянно-каркасных домов разрушились только четыре, тогда как среди железобетонных зданий обрушилось 60. Прослеживается переход от эмпирического использования дерева к научно обоснованным железобетонным поясам, которые предложил К.С. Завриев в 1926–1946 годах. Делается вывод о ценности исторического опыта для современного сейсмостойкого строительства.

Ключевые слова: антисейсмические пояса, деревянное армирование, сейсмостойкое строительство, каменная кладка, Каср эль-Бинт, набатейская архитектура, хатыл, Кносский дворец, Акротири, Парфенон, система baraccato, система pombalino, землетрясение, исторический опыт строительства.

Tomilova Elena Vladimirovna
Student,
Kuban State Technological University
vvyprintseva@yandex.ru

Dolgopolov Vasily Evgenievich
Senior Lecturer,
Kuban State Technological University
dolgopolov_v@icloud.com

Danko Vladislav Pavlovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department,
Kuban State Technological University
Vladislav.danko@mail.ru

Annotation. The article aims to research the historical experience of using wooden anti seismic belts in masonry and brickwork as one of the oldest and most widespread techniques for seismic protection of buildings. It analyses examples of this technology's application in various civilisations: from Minoan Crete (the Palace of Knossos, the settlement of Akrotiri, 2nd millennium BCE) and Ancient Greece to the Nabataean temple Qasr al Bint in Petra (1st century BCE – 1st century CE) and traditional construction in the Ottoman Empire (the hatıl system). It is shown that wooden beams embedded in the thickness of stone walls served as horizontal ties, binding the masonry into a single deformable system and reducing shear stresses by up to 33–50 %. The effectiveness of this method is confirmed by research results on the consequences of earthquakes in Turkey (1999), when only four out of 789 traditional timber framed buildings collapsed, while 60 reinforced concrete structures failed. Anchored on historical analysis, the evolution of anti-seismic techniques is traced – from the empirical embedding of wood in masonry to the engineering based reinforced concrete belts proposed by K.S. Zavriev in 1926–1946 – and conclusions are drawn on the significance of the accumulated experience for modern earthquake resistant construction.

Keywords: anti seismic belts, timber reinforcement, earthquake resistant construction, masonry, Qasr al Bint, Nabataean architecture, hatıl, Palace of Knossos, Akrotiri, Parthenon, baraccato system, pombalino system, earthquake, historical construction experience.

Введение

В сейсмоактивных регионах древние строители постоянно имели дело с подземными толчками, которые разрушали постройки и уносили жизни. Камень и кирпич хорошо сопротивляются сжатию, но плохо переносят горизонтальные сдвиги, возникающие при землетря-

сении. Хрупкая кладка на слабом растворе в таких условиях быстро теряет целостность. Чтобы избавиться от этой проблемы, в разных регионах стали закладывать деревянные балки в толщу стены. Они получили название антисейсмических поясов.

У этого приёма нет одного изобретателя – он возникал самостоятельно в разных уголках сейсмически активного мира: в Эгейском регионе, Леванте, Анатолии, Иране, на Кавказе и даже в Южной Америке. Будучи более мягким и упругим чем камень, дерево способно при толчке способно поглощать часть энергии, распределяя её воздействие по периметру стены и препятствуя расхождению отдельных участков кладки. Стена получает возможность немного двигаться, не разрушаясь сразу. Сейсмическая волна, идущая снизу вверх, на уровне деревянного пояса частично гасится и меняет направление, что снижает нагрузку на верхние части здания.

Показательным случаем является Стамбульское землетрясение 1509 года, унёсшее более 13 тысяч жизней. После него османские власти запретили строить дома из одной только каменной кладки и потребовали использовать деревянный каркас. Спустя почти пять столетий землетрясения в Коджаэли и Дюздже (1999) подтвердили правоту этого решения: из 789 традиционных деревянно-каркасных домов устояли все, кроме четырёх, а среди железобетонных зданий обрушилось 60. Получается, что приёмы, найденные опытным путём за тысячи лет, в некоторых случаях оказывались надёжнее инженерных решений XX века.

Целью статьи является исследование эволюции применения деревянных антисейсмических поясов в каменной и кирпичной кладке на примере различных памятников архитектуры: от минойского Крита и Древней Греции до набатейской Петры, Османской империи и перехода к железобетонным антисейсмическим поясам в XX веке в нашей стране.

1. Набатейский храм Каср эль-Бинт в Петре

Одним из примеров применения деревянных антисейсмических поясов служит храм Каср эль-Бинт (Qasr el-Bint), который был построен набатейцами в городе Петра (территория современной Иордании) в I веке до н. э. – I веке н. э. Он имеет форму почти правильного квадрата (27,9 × 27,6 м) и стоит на подиуме высотой около 3 м. Общая высота здания достигала примерно 23 м. Благодаря квадратному основанию при землетрясении нагрузка распределялась по всей площади относительно равномерно, что повышало устойчивость конструкции от землетрясений.

Главная особенность храма – горизонтальные деревянные балки из ливанского кедра, заложенные в несущие стены. Они шли рядами по периметру на нескольких уровнях и охватывали здание своеобразными поясами. Песчаник, из которого сделаны стены, значительно твёрже дерева, поэтому балки принимали на себя часть сейсмической энергии и деформировались упруго. Волна, идущая со стороны земли, на уровне балок частично гасилась и отклонялась в горизонтальном направлении, снижая нагрузку на верхние ярусы. Когда дерево сгнило, в кладке остались пустые борозды – по ним археологи и восстановили первоначальную схему армирования.

Современные исследования с применением метода конечных элементов (в программном комплексе ABAQUS) показали, что деревянные балки в стенах Каср эль-Бинт снижали сдвиговые напряжения в конструкции до 33–50 % при сейсмических нагрузках. Благодаря этому храм высотой 23 метра смог пережить несколько умеренных землетрясений и смог простоять два тысячелетия, хоть и не сохранился полностью.

Вопрос о том, откуда набатейцы заимствовали эту технологию, остаётся открытым. Набатейцы не оставили строительных трактатов, поэтому исследователи (прежде всего Шахер Рабабех, автор монографии «How Petra was Built») выделяют три вероятных источника влияния. Во-первых, левантийская традиция железного века: в зданиях Хацора, Самарии и Мегиддо (Северная Палестина) археологи обнаружили узкие щели 6–10 см между рядами кладки, оставшиеся от сгнивших деревянных балок. То есть местные строители Леванта уже закладывали дерево в каменные стены еще до набатейцев. Во-вторых, эллинистическое влияние: набатейцы активно контактировали с эллинистическим миром, особенно с Александрией, заимствуя у него архитектурный декор (коринфские капители, сломанные фронтоны) и конструктивные приёмы – например, систему перекрёстных арок с деревянными затяжками, применявшуюся в эллинистических зданиях на Делосе. В-третьих, собственный эмпирический опыт: Петра находится в сейсмически активной зоне, и набатейцы, проживавшие там столетиями, знали о разрушительных последствиях землетрясений для каменных стен самолично.

Так же следует отметить, что в районе Петры деревьев почти нет – лишь можжевельник и оливки. Поэтому набатейцы применяли дерево не повсеместно, а только в ключевых монументальных постройках, наподобие Каср эль-Бинт и, вероятно, Храма крылатых львов. Для деревянных поясов использовали привозной ливанский кедр, остатки которого сохранились в стенах храма до сегодняшних дней. В остальных зданиях дерево берегли и перекрывали помещения арками, сводами и песчаниковыми плитами. Кроме того, набатейцы сознательно отказались от металлических скоб (пиронов) для соединения камней – в отличие от римлян и греков. Причина кроется в том, что местный песчаник слишком мягкий, и металлические скобы вызывали бы сколы и отслоения. Вместо металла они использовали деревянные клинья между кам-

нями и раствор. Дерево, в отличие от металла, распределяло нагрузку мягко, без точечного давления, что было подходящим решением для хрупкого песчаника.

2. Минойский Крит: самые ранние примеры

Самые ранние известные антисейсмические пояса – деревянные балки, заложенные в каменную кладку стен – относятся к минойской цивилизации на Крите и датируются II тысячелетием до н. э. Крит отличался высокой сейсмичностью, и местные строители выработали приём закладывания деревянных брусьев в кладку эмпирически, задолго до каких-либо теоретических обоснований.

В Кносском дворце (XVII–XV вв. до н. э.) внешние стены были трёхслойными: каменные плиты ставили на ребро – одни вдоль, другие поперёк, – а пространство между ними заполняли бутовым камнем. Внутренние стены армировали деревянными брусьями в вертикальном и горизонтальном направлениях. Эти брусья связывали стены между собой и с перекрытиями в замкнутую систему. Благодаря дереву стена становилась упругой: при толчках она слегка двигалась, но не растрескивалась. Фактически, они уже были полноценными деревянными антисейсмическими поясами – тот же принцип, который позже, спустя полторы тысячи лет, использовали набатейцы в Петре и османские строители в Анатолии.

Ещё более сложная система была обнаружена в поселении Акротири на острове Санторини (Фера), засыпанном пеплом после извержения вулкана в XV веке до н. э. Консервирующее действие вулканического пепла сохранило отпечатки всех деревянных элементов конструкций. В Акротири горизонтальные, вертикальные и поперечные деревянные балки закладывались в каменные стены несколькими уровнями, образуя полноценный деревянный каркас внутри кладки. В здании Xeste 3 деревянная рамная конструкция выдерживала нагрузку двухэтажной каменной стены над ней и пережила землетрясение, сопутствовавшее извержению. То есть, это был не просто антисейсмический пояс, а полный деревянно-каменный каркас – аналог турецкой системы хымыш, который будет рассмотрен ниже.

3. Древняя Греция: другая антисейсмическая стратегия

К V веку до н. э. греческие зодчие перешли к сухой кладке из тёсаного камня без раствора, изменив антисейсмические приёмы изменились. Деревянных поясов в стенах классических храмов больше не существует – вместо них греки выработали другую стратегию: позволить камню двигаться и гасить сейсмическую энергию трением. Этот принцип принципиально отличался от минойской традиции армирования стен деревом.

В Парфеноне (447–432 гг. до н. э.) блоки пентелийского мрамора пригоняли между собой без раствора. При толчке они могли немного смещаться, гася энергию трением, а затем возвращались на место под собственным весом. Блоки соединяли железными скобами и штырями, которые заливали свинцом. Свинец работал как мягкий амортизатор: он деформировался и не давал хрупкому железу лопнуть, а камню – треснуть. Кроме того, в храме есть курватуры – небольшие выпуклости стилобата и антаблемента – и наклон колонн внутрь. Эти детали создают дополнительное обжатие конструкции и повышают её сейсмостойкость.

В Эрехтейоне (421–406 гг. до н. э.) применялась та же сухая кладка с перевязкой швов и Т-образными скобами с заливкой свинцом. Горизонтальные поверхности блоков были сделаны шероховатыми – для максимального трения, а по краям – гладкими полосками для точной пригонки. Высокий коэффициент трения предотвращал смещение блоков при толчке. Интересно, что Эрехтейон нарушал главное правило сейсмостойкости – симметрию: его часть с западной стороны тяжелее части с восточной, портики-контрфорсы не имели общей оси, что создавало дополнительные крутящие моменты при землетрясении.

В Храме Артемиды в Эфесе (около 550 г. до н. э.) антисейсмическое решение было реализовано в фундаменте, а не в стенах. Храм намеренно поставили на болотистый грунт, который работал амортизатором. Под основание насыпали слои древесного угля и овечьей шерсти для стабилизации – приём, предложенный инженером Феодором Самосским. Раскопки XIX–XX веков подтвердили наличие слоёв угля и мраморной крошки в фундаменте.

В Храме Аполлона в Бассах (V век до н. э.) в фундаменте применялись прослойки мелкого камня в швах между блоками – мелкий камень позволял блокам скользить между собой при землетрясении, снижая нагрузки. Таким образом, в Древней Греции сложились два разных подхода к сейсмозащите: минойский – армирование стен деревом и классический – сухая кладка с металлическими связями, свинцовыми амортизаторами и трением. Оба подхода оказались достаточно эффективными, но классический греческий подход отказался от дерева в несущих стенах полностью, заменив его совершенно другим механизмом поглощения энергии.

4. Османская империя: система хатыл

В Анатолии и Фракии система деревянных антисейсмических поясов применялась веками и получила название хатыл (турецк. hatıl, мн. ч. hatıllar). Хатыл – это горизонтальный деревянный брус (или бревно), заделанный в толщу несущей каменной или кирпичной стены. Несколько таких балок, уложенных по периметру здания на определённом расстоянии друг от друга, образовывали пояса – своего рода деревянные обвязки, которые опоясывали весь дом и связывали кладку в единую деформируемую систему.

Согласно этнографическим описаниям турецкого жилищного строительства, балки хатыл изготавливали из брёвен диаметром 6–10 см и длиной 1,5–2 метра. Их укладывали впритык друг к другу, так что они сплошь опоясывали весь дом. Схема расположения была строго выверенной: первый пояс закладывали между фундаментом и началом кладки стен (на стыке камня и кирпича или самана), верхний – между брёвнами потолка и стеной на уровне перекрытия, промежуточные – один-два ряда на уровне нижней и верхней частей оконных рам. Вертикальное расстояние между поясами составляло около 1–1,5 м. В результате, по высоте стены проходило 3–4 деревянных обвязки, каждая из которых замыкалась в кольцо по периметру здания.

Хатыл был не просто традицией османской архитектуры, а продуманным конструктивным решением. Деревянные пояса связывали хрупкую каменную или кирпичную кладку, которая при сотрясении легко рассыпается. Кроме того, они делили высокую стену на несколько более коротких участков – у каждого из них лучше соотношение высоты и ширины, поэтому риск опрокидывания снижается. Балки также задавали направление трещин: при землетрясении стена растрескивалась вдоль пояса, и дальше трещина не шла, так как энергия рассеивалась, а стена не разрушалась целиком. При кладке на слабом растворе балки выполняли роль опалубки и помогали держать горизонталь. Наконец, в уровне пола и потолка они жёстко связывали стены с деревянными перекрытиями, так что всё здание работало как единая коробка.

В традиционном строительстве Анатолии несущие стены нижнего этажа возводились из каменной кладки (taş duvar) высотой от 50 см до 2–2,5 м в зависимости от рельефа. Толщина стен составляла 70–110 см. Крупные камни клали снаружи, промежутки забивали мелким камнем и глиняным раствором. Именно в эту кладку закладывали пояса хатыла. Верхние этажи часто строили по системе хымыш (hımış) – это не обычные балки в кладке, а полноценный деревянный каркас (стойки, ригели, раскосы), заполненный кирпичом, саманом или камнем. Часто оба приёма сочетали в одном здании: первый этаж – каменная кладка с хатылом, второй – хымыш.

Парадоксально, но слабый глиняный раствор работал лучше при землетрясениях, чем прочный: он позволял кирпичам и камням скользить по швам, рассеивая энергию, а не трескаться монолитом. Это его свойство получило название «разрыхление связи» (loosening the bond) и было осознано строителями эмпирически задолго до момента, как оно получило научное объяснение.

После Стамбульского землетрясения 1509 года, унёсшего более 13000 жизней, османские власти формально запретили каменную кладку и предписали использовать деревянно-каркасные дома. Исследования последующих землетрясений (Коджаэли и Дюздже, 1999) показали: из 789 традиционных деревянно-каркасных зданий обрушилось всего 4, тогда как 60 железобетонных зданий рухнули. При этом хатыл-конструкции получали повреждения средней и тяжёлой степени, но не складывались. Причина: когда хатыл-балки замыкались по периметру (опоясывали весь фасад и углы), они существенно снижали разрушение углов – а именно углы являются самым слабым местом при землетрясении.

5. Европейские антисейсмические традиции: Италия и Португалия

Технология деревянных поясов в каменной кладке была известна и в Европе, где она также возникала как реакция на разрушительные землетрясения.

В Италии после ряда землетрясений выработали традицию закладывать деревянные балки в каменные стены – так называемую систему baraccato. В Беневенто этот приём появился после землетрясения 1627 года, в Аквиле – после землетрясения 1703 года, в Калабрии – после землетрясения 1783 года. Деревянные балки в кладке работали как горизонтальные связи, связывая стены и повышая их способность противостоять сейсмическим толчкам.

В Португалии после Лиссабонского землетрясения 1755 года маркиз Помбал ввёл обязательное строительство с деревянным каркасом внутри каменных стен – систему, получившую название pombalino. Это была уже не просто традиция, а государственная нормативная программа антисейсмического строительства: все новые здания в Лиссабоне должны были возводиться по этой системе. Деревянный каркас pombalino включал вертикальные стойки, горизонтальные обвязки и диагональные раскосы, образуя жёсткую пространственную структуру внутри каменной кладки – принцип, близкий к турецкому хымышу.

6. От дерева к железобетону: инженерное обоснование

С течением времени технология антисейсмических поясов эволюционировала. Появление новых строительных материалов – железобетона, стали – и развитие инженерных расчётов позволили перейти от эмпирического закладывания древесины в кладку к научно обоснованным антисейсмическим системам.

Инженерно обоснованные железобетонные антисейсмические пояса впервые предложил академик Кириак Самсонович Завриев (1886–1954) – армянский и советский учёный-строитель, основатель теории сейсмостойкого строительства. В 1926 году он предложил «подпоясывать» дома антисейсмическими поясами, сравнивая это с обручем на бочке. В 1936 году в

монографии описал, как железобетонные пояса повышают сейсмостойкость каменных зданий. В 1946 году развил эту идею: предложил использовать пояса для связи стен с перекрытиями и между собой, заменив прежнюю схему с анкеровкой балок из инструкции Наркомстроя. Завриев создал и возглавил Закавказский институт сооружений, разработал теорию сейсмостойкого строительства и руководил проектированием ответственных объектов в сейсмоопасных районах.

Переход от дерева к железобетону не означал отказа от принципа, выработанного тысячелетиями: пояс должен опоясывать здание, связывая стены в единую деформируемую систему. Железобетон обеспечил большую прочность и долговечность по сравнению с деревом, которое подвержено гниению, горению и биологическому разрушению. Однако сама идея горизонтального пояса, поглощающего сейсмическую энергию и связывающего кладку, осталась неизменной – от минойских дворцов до современных норм сейсмостойкого строительства.

Выводы

1. Деревянные антисейсмические пояса в каменной и кирпичной кладке – один из древнейших и наиболее распространённых приёмов сейсмозащиты зданий, применявшийся независимо в нескольких цивилизациях: от минойского Крита (II тысячелетие до н. э.) до Османской империи и Европы Нового времени.

2. Принцип действия деревянного пояса основан на упругих свойствах древесины, которая поглощает часть сейсмической энергии, перераспределяет напряжения по периметру стены и связывает кладку в единую деформируемую систему. Современные расчёты подтверждают снижение сдвиговых напряжений до 33–50 % (на примере Каср эль-Бинт).

3. Набатейский храм Каср эль-Бинт в Петре – выдающийся пример применения этой технологии. Набатейцы синтезировали левантийскую традицию железного века, эллинистические конструктивные приёмы и собственный эмпирический опыт, адаптировав технологию к местным условиям: мягкий песчаник, дефицит древесины, сейсмическая активность. Использование привозного ливанского кедра только в ключевых зданиях свидетельствует о сознательном, целенаправленном применении деревянных поясов.

4. Минойская цивилизация на Крите (Кносский дворец, Акротири) применяла самую раннюю и наиболее развитую систему деревянного армирования каменной кладки, включавшую горизонтальные, вертикальные и поперечные балки – фактически полноценный деревянно-каменный каркас.

5. В Древней Греции классического периода (V век до н. э.) зодчие пошли по иному пути: отказавшись от дерева в несущих стенах, они перешли к сухой кладке с железными скобами и свинцовыми амортизаторами, рассчитывая на трение между блоками для гашения сейсмической энергии. Это была принципиально иная стратегия сейсмозащиты, основанная не на армировании стены упругим материалом, а на управлении подвижностью каменной кладки.

6. Османская система хатыл – наиболее документированная традиция применения деревянных поясов. После Стамбульского землетрясения 1509 года использование деревянных поясов стало обязательным. Исследования землетрясений 1999 года подтвердили высокую эффективность традиционных каркасных конструкций: из 789 деревянно-каркасных зданий обрушилось лишь 4, тогда как 60 железобетонных зданий рухнули.

7. Европейские системы baraccato (Италия) и pombalino (Португалия) развивались как государственные ответные меры на разрушительные землетрясения и представляли собой нормативные программы антисейсмического строительства с обязательным применением деревянных каркасов и поясов в каменных стенах.

8. Переход к железобетонным антисейсмическим поясам в XX веке (работы К.С. Завриева, 1926–1946 гг.) не изменил принципиальную идею горизонтального пояса, опоясывающего здание, – он лишь заменил материал с дерева на железобетон, обеспечив большую долговечность и прочность. Таким образом, современная теория сейсмостойкого строительства является прямым наследником эмпирического опыта, накопленного строителями древности и Средневековья.

9. Исторический опыт применения деревянных антисейсмических поясов сохраняет практическую ценность для современного строительства, особенно в области сохранения исторических памятников в сейсмически активных регионах, а также при проектировании малоэтажных зданий в развивающихся странах, где железобетон может быть экономически недоступен, а традиционные методы с использованием местных материалов доказали свою эффективность на протяжении столетий.

Литература

1. Rababeh S. How Petra was Built: An analysis of the construction techniques of the Nabataean freestanding buildings and rock-cut monuments in Petra, Jordan. – Oxford : Archaeopress, 2005.
2. Netzahualcoyotl A. On the Use of Wooden Beams as an Anti-Seismic Device in Stone Masonry in Qasr el-Bint, Petra, Jordan / A. Netzahualcoyotl, P. Ranaldi, G. Biondi // ResearchGate. – 2018.

3. Gulkan P. The earthquake resistance of traditional timber and masonry buildings in Turkey / P. Gulkan, R. Langenbach // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. – 2004.
4. Langenbach R. Don't Tear it Down! Preserving the Earthquake Resistant Vernacular Architecture of Kashmir // UNESCO. – 2009.
5. Touliatos P. The Role of Timber in the Structural Behaviour of Minoan Constructions // ResearchGate. – 2018.
6. Академик К.С. Завриев и развитие сейсмостойкого строительства // Вокруг света. – URL : https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/5236/
7. История сейсмостойкого строительства // Википедия. – URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Сейсмостойкое_строительство
8. Architectural evidence of antiseismic constructions in antiquity // Academia.edu. – 2015.

References

1. Rababeh S. How Petra was Built: An analysis of the construction techniques of the Nabataean freestanding buildings and rock-cut monuments in Petra, Jordan. – Oxford : Archaeopress, 2005.
2. Netzahualcoyotl A. On the Use of Wooden Beams as an Anti-Seismic Device in Stone Masonry in Qasr el-Bint, Petra, Jordan / A. Netzahualcoyotl, P. Ranaldi, G. Biondi // ResearchGate. – 2018.
3. Gulkan P. The earthquake resistance of traditional timber and masonry buildings in Turkey / P. Gulkan, R. Langenbach // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. – 2004.
4. Langenbach R. Don't Tear it Down! Preserving the Earthquake Resistant Vernacular Architecture of Kashmir // UNESCO. – 2009.
5. Touliatos P. The Role of Timber in the Structural Behaviour of Minoan Constructions // ResearchGate. – 2018.
6. Academician K.S. Zavriev and the Development of Earthquake-Resistant Construction // Vokrug Sveta. – URL : https://www.vokrugsveta.ru/vs/article/5236
7. History of Earthquake-Resistant Construction // Wikipedia. – URL : https://ru.wikipedia.org/wiki/Сейсмостойкое_строительство
8. Architectural evidence of antiseismic constructions in antiquity // Academia.edu. – 2015.

УДК 539.4

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЖАТЫХ И ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

♦♦♦♦♦

METHODOLOGICAL FOUNDATIONS FOR ASSESSING THE STRESS-STRAIN STATE AND LOAD-BEARING CAPACITY OF COMPRESSED AND BENT REINFORCED CONCRETE ELEMENTS BASED ON DEFORMATION MODELS

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Бобр Наталья Владиславовна
студентка кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
natalialenskaya2005@gmail.com

Аннотация. В статье представлен анализ современных подходов к расчету прочности, трещиностойкости и деформативности сжатых и изгибаемых железобетонных элементов. Рассмотрены эволюция расчетных методов от традиционных нормативных к нелинейным деформационным моделям, основанным на реальных диаграммах деформирования бетона и арматуры. Особое внимание уделено вопросам учета физической нелинейности при кратковременных и длительных воздействиях, а также влиянию дисперсного армирования на работу конструкций. Показано, что применение нелинейных моделей позволяет более достоверно оценивать действительную работу элементов на всех стадиях нагружения, включая запредельные, что критически важно для расчетов на прогрессирующее обрушение и особые воздействия. Обоснована необходимость дальнейшего совершенствования методов расчета с учетом современных материалов и технологий армирования.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, сжатые элементы, изгибаемые элементы, нелинейная деформационная модель, диаграмма деформирования, несущая способность, деформативность, физическая нелинейность, дисперсное армирование, сталефибробетон.

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Bobr Natalia Vladislavovna
Student of the Department
of Industrial and Civil Engineering
Kuban State Technological University
natalialenskaya2005@gmail.com

Annotation. The article presents an analysis of modern approaches to calculating the strength, crack resistance, and deformability of compressed and bent reinforced concrete elements. The evolution of calculation methods from traditional standards to nonlinear deformation models based on real deformation diagrams of concrete and reinforcement is considered. Special attention is paid to the issues of accounting for physical nonlinearity under short-term and long-term loads, as well as the influence of dispersed reinforcement on the performance of structures. It is shown that the use of nonlinear models makes it possible to more reliably assess the actual performance of elements at all stages of loading, including beyond-limit conditions, which is critically important for calculations of progressive collapse and special loads. The necessity of further improving calculation methods, taking into account modern materials and reinforcement technologies, is substantiated.

Keywords: reinforced concrete structures, compressed elements, bending elements, nonlinear deformation model, deformation diagram, load-bearing capacity, deformability, physical nonlinearity, dispersed reinforcement, steel-fiber concrete.

Железобетонные конструкции являются основой современного строительства, обеспечивая надежность и долговечность зданий и сооружений. Среди всего многообразия железобетонных элементов особое место занимают сжатые и изгибаемые конструкции, которые составляют основу несущих систем зданий и инженерных сооружений. Классическими примерами являются колонны, стойки, балки, ригели и плиты перекрытий, работающие соответственно на центральное или внецентренное сжатие и на изгиб.

На протяжении десятилетий методы расчета железобетонных конструкций эволюционировали от простых инженерных методик, основанных на упругой работе материалов, к более сложным моделям, учитывающим физическую и геометрическую нелинейность. Традиционный подход, реализованный в нормативных документах, использует метод предельных усилий, где несущая способность определяется на основе эмпирических зависимостей. Однако такой под-

ход не всегда позволяет адекватно оценить действительное напряженно-деформированное состояние (НДС) элемента на всех стадиях его работы, особенно при сложных комбинациях нагрузок, длительных воздействиях и в условиях, близких к аварийным.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка и совершенствование методов расчета, которые бы с высокой точностью описывали работу железобетонных элементов как единого композитного материала. Переход к нелинейным деформационным моделям, базирующимся на реальных физических диаграммах деформирования бетона и арматуры, является магистральным направлением развития теории железобетона. Эти модели открывают возможности для более достоверного прогнозирования прочности, деформативности и трещиностойкости, а также для проектирования конструкций с повышенной живучестью и надежностью.

Постановка задачи

Целью настоящего исследования является систематизация современных подходов к расчету сжатых и изгибаемых железобетонных элементов и анализ перспективных направлений их совершенствования. В работе решаются следующие задачи: анализ существующих методов расчета на прочность и деформативность; оценка применимости нелинейных деформационных моделей для различных типов элементов; исследование влияния дисперсного армирования на работу изгибаемых конструкций; определение путей дальнейшего развития расчетного аппарата.

Методы расчета и их развитие

Традиционные методы расчета. Основой для проектирования железобетонных конструкций долгое время служили методы расчета по предельным состояниям, которые устанавливают расчетные сопротивления материалов и используют коэффициенты условий работы. Для изгибаемых элементов расчет прочности нормальных сечений производится на основе прямоугольной эпюры напряжений в сжатом бетоне, что является значительным упрощением действительной картины распределения напряжений. Для сжатых элементов (внецентренно сжатых) применяются формулы, учитывающие случайный эксцентриситет и влияние гибкости.

Нелинейные деформационные модели. Альтернативой традиционным методам служат деформационные модели, в которых НДС сечения определяется на основе совместного решения уравнений равновесия и гипотезы плоских сечений (гипотезы Бернулли). Ключевым элементом этих моделей является использование реальных диаграмм деформирования материалов (σ-ε). Для бетона это могут быть как простые параболические зависимости, так и более сложные кривые, учитывающие работу материала за пиком прочности на нисходящей ветви.

Наиболее перспективной является методика, при которой для каждого волокна сечения задается своя диаграмма деформирования, а решение ищется итерационным путем. Это позволяет с высокой точностью отслеживать развитие трещин, перераспределение напряжений между бетоном и арматурой и определять момент разрушения элемента. Данный подход реализован в ряде исследовательских работ и показывает высокую сходимость с экспериментальными данными. Использование кусочно-линейной диаграммы для арматуры, учитывающей наличие площадки текучести и упрочнения, также повышает точность расчета.

Особенности расчета сжатых элементов. Для сжатых элементов, особенно внецентренно сжатых, критическое значение имеет учет гибкости, которая приводит к дополнительному изгибу от продольной силы. Нелинейные модели позволяют естественным образом учесть этот эффект, который в нормативных методиках часто вводится через эмпирические коэффициенты. Кроме того, такие модели дают возможность точнее оценить несущую способность сечений с различными схемами армирования, включая случаи симметричного и несимметричного армирования, а также с использованием высокопрочной арматуры.

Особенности расчета изгибаемых элементов. Для изгибаемых элементов деформационная модель позволяет не только определить момент разрушения, но и рассчитать полную диаграмму деформирования (M-θ или M-f), что является критически важным для оценки жесткости конструкций и их деформативности. Это особенно актуально для предварительно напряженных элементов, где работа материалов на ранних стадиях нагружения имеет свои особенности. Такой подход позволяет более обоснованно подходить к расчету прогибов и ширины раскрытия трещин.

Влияние дисперсного армирования на работу элементов. В последние годы все большее распространение получает дисперсное армирование бетона стальной или полимерной фиброй. Введение фибры позволяет существенно повысить трещиностойкость, ударную вязкость и пластические свойства бетона. Исследования показывают, что дисперсное армирование напрягающего бетона значительно повышает его пластическую деформативность и способность к диссипации энергии, что особенно важно для конструкций, работающих в особых расчетных ситуациях (например, при аварийных воздействиях). В изгибаемых элементах фиб-

ра, распределенная по объему, эффективно работает в растянутой зоне, позволяя уменьшить количество традиционной стержневой арматуры, особенно поперечной, и повысить общую несущую способность наклонных сечений. Для учета работы фибры в нелинейных моделях вводятся дополнительные компоненты в диаграмме деформирования растянутого бетона, что является предметом активных исследований.

Перспективные направления развития. Дальнейшее развитие методов расчета связано с внедрением численных методов, таких как метод конечных элементов, в сочетании с нелинейными моделями материалов. Это позволяет перейти от расчета отдельного сечения к расчету всей конструкции или системы с учетом перераспределения усилий. Одним из наиболее прогрессивных подходов является использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования несущей способности элементов с учетом их коррозионных повреждений и последующего усиления. Данный метод позволяет учитывать сложные нелинейные взаимосвязи между множеством факторов, что делает прогнозы более точными по сравнению с традиционными регрессионными моделями.

Проведенный анализ показывает, что переход к нелинейным деформационным моделям при расчете сжатых и изгибаемых железобетонных элементов является оправданным и необходимым шагом. Эти модели, основанные на реальных диаграммах деформирования материалов, позволяют с высокой точностью оценивать напряженно-деформированное состояние, определять действительную несущую способность и прогнозировать характер разрушения. Особую ценность они представляют при проектировании конструкций с повышенными требованиями по надежности, а также при использовании новых видов армирования, например, сталефибрового.

Совершенствование методов расчета должно идти по пути интеграции нелинейных моделей в инженерную практику, разработки эффективных вычислительных алгоритмов и учета всего многообразия факторов, влияющих на работу железобетона. Использование современных информационных технологий, включая нейросетевые подходы, открывает новые горизонты для создания систем мониторинга и прогнозирования состояния конструкций в течение всего их жизненного цикла.

Литература

1. Живучесть железобетонных каркасных систем из напрягающего сталефибробетона / А.А. Лизогуб [и др.] // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2024. – № 2. – С. 93–104.
2. Римшин В.И. Нейросетевое прогнозирование несущей способности железобетонных элементов / В.И. Римшин, П.А. Амелин, Л.А. Сулейманова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 11. – С. 42–55.
3. Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований / В.И. Колчунов [и др.] // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 3. – С. 31–71.
4. Influence of hybrid steel-polyacrylonitrile fibers on the mechanical toughness and freeze-thaw resistance of sulfoaluminate cement composites / Y. Wang [et al.] // Cement and Concrete Composites. – 2024. – Vol. 148. – Art. 105489.
5. Capillary Water Absorption Characteristics of Steel Fiber-Reinforced Concrete / F. Nan [et al.] // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 9. [cited 2024].
6. Effect of Structural Details of Beam-to-column Joint in RC Viaducts on Capacity // Quarterly Report of RTRI. – 2024. – Vol. 65. – № 4. – P. 223–229.
7. Уткин Д.Г. Прочность изгибаемых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры // Строительство и реконструкция. – 2024. (в печати).
8. Плевков В.С. Прочность и деформативность железобетонных элементов с зонным фибровым армированием при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, Д.Г. Уткин, А.Е. Карпов // Современные проблемы расчета и конструирования железобетонных конструкций зданий и сооружений. – 2024. (в печати).
9. Методика нелинейного расчета НДС нормальных сечений изгибаемых и сжатых элементов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. (в печати).
10. Анализ итерационных методов расчета железобетонных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. (в печати).

References

1. Durability of reinforced concrete frame systems made of prestressed steel-fiber concrete / A.A. Lizogub [et al.] // Bulletin of the Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering. – 2024. – № 2. – P. 93–104.

2. Rimshin V.I. Neural network forecasting of the load-bearing capacity of reinforced concrete elements / V.I. Rimshin, P.A. Amelin, L.A. Suleymanova // Bulletin of the V.G. Shukhov BSTU. – 2024. – № 11. – P. 42–55.
3. The survivability of structural systems of buildings and structures: an analytical review of research / V.I. Kolchunov [et al.] // Construction and Reconstruction. – 2024. – № 3. – P. 31–71.
4. Influence of hybrid steel-polyacrylonitrile fibers on the mechanical toughness and freeze-thaw resistance of sulfoaluminate cement composites / Y. Wang [et al.] // Cement and Concrete Composites. 2024. Vol. 148. Art. 105489.
5. Capillary Water Absorption Characteristics of Steel Fiber-Reinforced Concrete / F. Nan [et al.] // Buildings. – 2025. – Vol. 15. – № 9. [cited 2024].
6. Effect of Structural Details of Beam-to-column Joint in RC Viaducts on Capacity // Quarterly Report of RTRI. – 2024. – Vol. 65. – № 4. – P. 223–229.
7. Utkin D.G. Strength of bent reinforced concrete elements with zone reinforcement of steel fiber // Construction and reconstruction. – 2024. (in press).
8. Plevkov V.S. Strength and deformability of reinforced concrete elements with zonal fiber reinforcement under short-term dynamic loading / V.S. Plevkov, D.G. Utkin, A.E. Karpov // Modern problems of calculation and design of reinforced concrete structures of buildings and structures. – 2024. (in press).
9. Methodology for nonlinear calculation of the stress-strain state of normal cross-sections of bending and compression elements // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2024. (in press).
10. Analysis of iterative methods for calculating reinforced concrete structures // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2024. (in press).

УДК 539.4

КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

♦♦♦♦♦

CRITICAL ANALYSIS OF MODERN THEORETICAL FOUNDATIONS FOR THE CREEP ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Бобр Наталья Владиславовна
студентка кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
natalialenskaya2005@gmail.com

Аннотация. В настоящей статье представлен критический анализ современных теоретических подходов к описанию ползучести бетона и железобетона, лежащих в основе нормативных методов расчета. Рассмотрена эволюция реологических моделей от классической линейной теории наследственной ползучести, базирующейся на принципе суперпозиции Больцмана, до нелинейных formulations, учитывающих сложный характер деформирования материала. Подробно исследованы основные допущения, принятые в действующих нормативных документах, и выявлены системные ошибки, заложенные в фундаментальные уравнения. Показано, что использование принципа наложения, ошибочная трактовка закона Гука и замена нелинейных свойств бетона линейными моделями приводят к существенному искажению результатов расчета, особенно для сжатых элементов, где эти погрешности проявляются наиболее критично. Обоснована необходимость пересмотра теоретических основ с целью разработки более адекватных методов прогнозирования длительных деформаций и надежности железобетонных конструкций.

Ключевые слова: ползучесть бетона, железобетонные конструкции, реологическая модель, принцип суперпозиции, нелинейная ползучесть, длительные деформации, наследственная теория, нормативные методы расчета, надежность конструкций.

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Bobr Natalia Vladislavovna
Student of the Department
of Industrial and Civil Engineering
Kuban State Technological University
natalialenskaya2005@gmail.com

Annotation. This article presents a critical analysis of modern theoretical approaches to describing the creep of concrete and reinforced concrete, which underpin the regulatory calculation methods. The evolution of rheological models is examined, from the classical linear theory of hereditary creep, based on the Boltzmann superposition principle, to nonlinear formulations that take into account the complex nature of material deformation. The main assumptions adopted in the current regulatory documents have been examined in detail, and systemic errors embedded in the fundamental equations have been identified. It has been shown that the use of the superposition principle, an erroneous interpretation of Hooke's law, and the replacement of the nonlinear properties of concrete with linear models lead to a significant distortion of the calculation results, especially for compressed elements, where these errors manifest themselves most critically. The need to revise the theoretical foundations in order to develop more adequate methods for predicting long-term deformations and the reliability of reinforced concrete structures has been substantiated.

Keywords: concrete creep, reinforced concrete structures, rheological model, superposition principle, nonlinear creep, long-term deformations, hereditary theory, standard calculation methods, structural reliability.

Ползучесть бетона представляет собой фундаментальное свойство материала, проявляющееся в неупругом нарастании деформаций во времени при постоянном уровне напряжений. Данное явление оказывает определяющее влияние на напряженно-деформированное состояние и несущую способность железобетонных конструкций в течение всего срока эксплуатации. Длительные деформации приводят к перераспределению усилий в статически неопределимых системах, возрастанию прогибов, потере преднапряжения и, как следствие, могут служить причиной снижения надежности и преждевременного исчерпания несущей способности.

Разработка адекватных теоретических моделей ползучести бетона и железобетона является одной из центральных задач современной механики материалов и конструкций. Однако, как показывает анализ специальной литературы, существующие теоретические подходы со-

держат ряд допущений, которые не всегда соответствуют физической природе деформирования бетона и могут приводить к существенным погрешностям в инженерных расчетах.

Основные теоретические модели и их критика

Современная теория ползучести железобетона, принятая в большинстве нормативных документов, включая отечественные СП и международные стандарты, базируется на классической линейной теории наследственной ползучести, разработанной в трудах Н.Х. Арутюняна, Н.М. Беляева, Ю.Н. Работнова и других исследователей. В основе этой теории лежит уравнение состояния, связывающее деформации бетона с историей нагружения через интеграл Больцмана-Вольтерра:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)\, J(t, t_0) + \int_{t_0}^{t} J(t, \tau)\, d\sigma(\tau)$$

где $J(t, \tau)$ – функция податливости, характеризующая деформацию от единичного напряжения, приложенного в момент времени τ и проявляющуюся к моменту t.

Данная модель основана на двух фундаментальных допущениях: принципе линейной связи между напряжениями и деформациями и принципе суперпозиции (наложения) Больцмана, согласно которому суммарная деформация определяется как суперпозиция реакций на каждое приращение напряжения.

Однако, как убедительно показано в работах А.Д. Беглова, Р.С. Санжаровского и Т.Н. Тер-Эммануильяна, эта теория содержит пять принципиальных переупрощений, которые искажают результаты расчета:

1. Необоснованное искажение классического закона Гука. Вместо фундаментальной алгебраической формы $\sigma = E\,\varepsilon$, которая устанавливает связь между напряжениями и деформациями в любой момент времени, в теории ползучести используется форма, где модуль упругости зависит от времени и дифференцируется по времени. Это приводит к искусственному появлению скоростей деформаций, что противоречит физическому смыслу закона Гука для мгновенных деформаций.

2. Навязывание бетону отсутствующего свойства алгебраической меры ползучести. Введение меры ползучести, определяемой как отношение деформации ползучести к упругой деформации от постоянного напряжения, предполагает возможность алгебраического (не интегрального) суммирования деформаций от переменных напряжений, что не соответствует экспериментальным данным для бетона.

3. Использование ошибочного принципа наложения (суперпозиции) Больцмана. Принцип суперпозиции справедлив для строго линейных систем, тогда как бетон проявляет нелинейные свойства даже при относительно низких уровнях напряжений. Эксперименты показывают, что нелинейность ползучести проявляется начиная с самых низких уровней напряжений.

4. Замена мгновенных нелинейных пластических деформаций упруговязкими деформациями (минутной ползучестью). В принятых моделях неупругие деформации, возникающие мгновенно при приложении нагрузки, описываются как вязкоупругие, что неверно отражает физическую природу явления.

5. Замена точных нелинейных и нестационарных свойств бетона линейными. Данное упрощение искажает качественную сторону явлений, присущих только нелинейным системам, что особенно критично при анализе устойчивости сжатых элементов и прогнозировании длительной прочности.

Экономические последствия ошибок

Значимость корректного учета ползучести выходит далеко за рамки академического дискурса. Учитывая колоссальные объемы применения железобетона в мировом строительстве, ошибки в теории, закладываемые в нормативные документы, приводят к необходимости использования необоснованных коэффициентов запаса. Это, в свою очередь, влечет за собой перерасход материалов и удорожание строительства. По оценкам авторов критических работ, экономический ущерб от применения неточных методов расчета сопоставим с затратами на само строительство, поскольку завышенные коэффициенты запаса, призванные компенсировать недостатки теории, закладываются в каждый проектируемый объект.

Нелинейные модели как альтернатива

В отличие от линейной теории, нелинейные модели ползучести учитывают зависимость реологических характеристик от уровня напряжений. Как отмечено в исследованиях Р.С. Санжаровского и М.М. Манченко, многочисленные экспериментальные данные подтверждают, что деформации ползучести нелинейно зависят от напряжений. В работах Е.А. Ларионова с соавторами предложено квазилинейное представление нелинейного реологического уравнения состояния, выведенное на основе концепции статистического распределения прочности отдельных фракций в структуре бетона.

Особый интерес представляет подход, в котором реализовано наложение частичных приращений деформаций, порожденных приращениями уровня напряжений, что позволяет корректно учесть старение бетона. Для стареющего бетона это является принципиальным отличием от предшествующих моделей, поскольку приводит к уточнению вида реологических уравнений.

Влияние на надежность конструкций

Практические последствия неучета или неточного учета ползучести особенно наглядно проявляются при оценке надежности длительно эксплуатируемых конструкций. Как показано в работах В.А. Пшеничкиной с соавторами, при обследовании железобетонных конструкций часто фиксируются сверхнормативные прогибы балок и плит, связанные с ползучестью бетона, проявляющейся при его раннем распалубливании. При этом визуальные признаки снижения несущей способности часто отсутствуют.

Вероятностный расчет балок на ползучесть методом статистического моделирования с учетом изменчивости прочности бетона для различных значений относительной влажности воздуха и возраста бетона на момент приложения нагрузки показывает, что индекс надежности балки при сроке эксплуатации 70 лет снижается в 2,4 раза. Это свидетельствует о том, что фактор ползучести должен рассматриваться не как детерминированная поправка, а как случайная величина с собственными статистическими характеристиками.

Перспективные направления развития

Одним из перспективных направлений является разработка двухмерных моделей ползучести для плитных конструкций, где длительные деформации проявляются в двух направлениях. В отличие от стержневых систем, где классическая одномерная модель ползучести относительно хорошо верифицирована, для плит и оболочек, работающих в условиях сложного напряженного состояния, адекватные методы расчета практически отсутствуют.

Диссертационные исследования последних лет направлены на создание универсальной методики реологического расчета железобетонных плит с учетом нелинейности как при длительном, так и при кратковременном нагружении. При этом ставится задача объединить два развивающихся обособленно направления: учет мгновенной нелинейности деформирования и реологический расчет.

Важным аспектом является также разработка моделей, учитывающих влияние температуры на кинетику ползучести. Современные нелинейные реологические модели, учитывающие температурный фактор, могут быть использованы для прогнозирования деформационной тенденции бетона во времени при различных температурных режимах эксплуатации.

Проведенный критический анализ показывает, что современная теория ползучести железобетона, основанная на линейных наследственных моделях, содержит ряд фундаментальных ошибок, связанных с неправомерным применением принципа суперпозиции, искажением закона Гука и заменой нелинейных свойств бетона линейными аппроксимациями. Эти ошибки не являются чисто академическими; они напрямую влияют на точность инженерных расчетов и ведут к экономическому ущербу.

Необходима полная переработка теоретических основ нормативных методов с переходом к нелинейным моделям, учитывающим реальную физическую природу деформирования бетона. Особенно актуальна разработка моделей для конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния (плиты, оболочки), а также создание вероятностных методов оценки надежности с учетом стохастической природы длительных деформаций.

Литература

1. Беглов А.Д. Современная теория ползучести железобетона / А.Д. Беглов, Р.С. Санжаровский, Т.Н. Тер-Эммануильян // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2024. – Т. 20. – № 1. – С. 3–13. – DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-3-13
2. Реологические уравнения состояния бетона / Е.А. Ларионов [et al.] // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2025. – Т. 21. – № 5. – С. 414–431. – DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-5-414-431
3. Петербургский государственный университет путей сообщения. Анализ напряженного состояния узла объединения стойки и пролетного строения рамного железобетонного моста в условиях деформаций ползучести и усадки // Издательский центр РИОР. – 2025. – С. 1013–1024.
4. Beglov A.D. Modern Theory of Creep of Reinforced Concrete / A.D. Beglov, R.S. Sanjarovsky, T.N. Ter-Emmanuilyan // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2024. – Vol. 20. – № 1. – P. 3–13. – DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-3-13
5. Тестирование программы численного анализа напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций с учетом эффекта быстро нарастающей ползучести бетона // Издательский центр РИОР. – 2024.

6. Ларионов Е.А. К теории ползучести бетона / Е.А. Ларионов, А.С. Маркович // Строительная механика и расчет сооружений. – 2025. – № 4. – С. 13–24
7. Надежность железобетонных конструкций с учетом фактора ползучести бетона / В.А. Пшеничкина [и др.] // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – С. 35–43.
8. Two-dimensional creep effects of RC slab structures // ScienceDirect. – 2024.
9. Санжаровский Р.С. Нелинейная теория ползучести бетона и железобетона и современные нормы / Р.С. Санжаровский, М.М. Манченко // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – Т. 13. – № 1. – С. 5–13.
10. Гатиев М.Ш. Напряженно-деформированное состояние железобетонных плит с учетом реологических свойств бетона : дис. … канд. техн. наук. – Грозный, 2024.

References

1. Beglov A.D. Modern theory of creep of reinforced concrete / A.D. Beglov, R.S. Sanzharovsky, T.N. Ter-Emmanuilyan // Structural mechanics of engineering structures and buildings. – 2024. – Vol. 20. – № 1. – P. 3–13. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-3-13
2. Rheological equations of the state of concrete / E.A. Larionov [et al.] // Structural mechanics of engineering structures and buildings. – 2025. – Vol. 21. – № 5. – P. 414-431. DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-5-414-431
3. St. Petersburg State Transport University. Analysis of the stress state of the joint between the column and the superstructure of a frame reinforced concrete bridge under conditions of creep and shrinkage deformations // RIOR Publishing Center. – 2025. – P. 1013–1024.
4. Beglov A.D. Modern Theory of Creep of Reinforced Concrete / A.D. Beglov, R.S. Sanjarovsky, T.N. Ter-Emmanuilyan // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2024. – Vol. 20. – № 1. – P. 3–13. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-3-13
5. Testing of a numerical analysis program for the stress-strain state of reinforced concrete structures, taking into account the effect of rapidly increasing creep of concrete // Publishing Center RIOR. – 2024.
6. Larionov E.A. On the theory of concrete creep / E.A. Larionov, A.S. Markovich // Structural Mechanics and Structural Analysis. – 2025. – № 4. – P. 13–24.
7. Reliability of reinforced concrete structures taking into account the creep factor of concrete / V.A. Pshenichkina [et al.] // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. – 2024. – P. 35–43.
8. Two-dimensional creep effects of RC slab structures // ScienceDirect. – 2024.
9. Sanzharovsky R.S. Nonlinear theory of creep of concrete and reinforced concrete and modern standards / R.S. Sanzharovsky, M.M. Manchenko // Structural mechanics of engineering structures and buildings. – 2017. – Vol. 13. – № 1. – P. 5–13.
10. Gatiev M.Sh. Stress-strain state of reinforced concrete slabs taking into account the rheological properties of concrete : dis. … for degree of Candidate of Technical Sciences. – Grozny, 2024.

УДК 539.4

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ И ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

♦♦♦♦♦

MODERN APPROACHES TO ASSESSING THE STRENGTH AND FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Гридунов Александр Владимирович
студент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
Alexraise2022@gmail.com

ннотация. В статье рассматриваются современные методы оценки прочности и огнестойкости железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию высоких температур. Анализируются факторы, определяющие огнестойкость, такие как тип и прочность бетона, характеристики арматуры, толщина защитного слоя и наличие трещин. Особое внимание уделяется поведению конструкций с использованием композитной арматуры (стеклопластиковой, базальтопластиковой) и фибробетона, а также перспективным методам усиления и восстановления после пожара. Рассматриваются экспериментальные и расчетные методики, включая нелинейные деформационные модели и численное моделирование, позволяющие прогнозировать предел огнестойкости без проведения натурных испытаний. Показано, что учет реального характера пожара, коррозионных повреждений и наличия трещин критически важен для достоверной оценки огнестойкости и разработки эффективных мер противопожарной защиты.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, огнестойкость, предел огнестойкости, высокие температуры, прочность, защитный слой бетона, композитная арматура, фибробетон, трещинообразование, численное моделирование, коррозия.

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Gridunov Alexander Vladimirovich
Student at the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
Alexraise2022@gmail.com

Annotation. The article examines modern methods for assessing the strength and fire resistance of reinforced concrete structures exposed to high temperatures. Factors determining fire resistance are analysed, such as the type and strength of concrete, the characteristics of the reinforcement, the thickness of the protective layer, and the presence of cracks. Special attention is paid to the behaviour of structures using composite reinforcement (glass fibre, basalt fibre) and fibre concrete, as well as promising methods of reinforcement and restoration after a fire. Experimental and computational methods are considered, including nonlinear deformation models and numerical modeling, which make it possible to predict the fire resistance limit without conducting full scale tests. It has been shown that taking into account the actual nature of the fire, corrosion damage, and the presence of cracks is critically important for a reliable assessment of fire resistance and the development of effective fire protection measures.

Keywords: reinforced concrete structures, fire resistance, fire resistance limit, high temperatures, strength, concrete protective layer, composite reinforcement, fiber concrete, crack formation, numerical modeling, corrosion.

Обеспечение прочности и огнестойкости железобетонных конструкций является одной из приоритетных задач при проектировании зданий и сооружений. Воздействие пожара приводит к прогреву бетона и арматуры, что вызывает снижение их прочностных и деформационных характеристик. Прочность бетона при нагреве уменьшается вследствие дегидратации цементного камня и возникновения термических напряжений, а прочность арматуры снижается из-за разупрочнения стали или деструкции полимерной матрицы в случае композитных материалов. Предел огнестойкости конструкции, определяемый временем от начала стандартного огневого воздействия до наступления одного из нормированных предельных состояний, является ключевым параметром, гарантирующим безопасную эвакуацию людей и сохранность здания в течение необходимого времени.

Современные нормативные документы, такие как СП 468.1325800.2019, регламентируют правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности бетонных и железобетонных кон-

струкций. Однако инженерная практика требует постоянного совершенствования методов расчета и проектирования, учитывающих многообразие применяемых материалов (высокопрочные бетоны, сталефибробетон, композитная арматура) и реальные условия эксплуатации, включая коррозионные повреждения и трещинообразование.

Факторы, определяющие огнестойкость железобетонных конструкций

На огнестойкость железобетонных конструкций влияет комплекс факторов. Ключевым параметром является толщина защитного слоя бетона, который выполняет теплоизолирующую функцию и предотвращает быстрый прогрев рабочей арматуры до критических температур. Исследования показывают, что увеличение толщины защитного слоя значительно повышает предел огнестойкости, однако чрезмерное увеличение может быть нецелесообразным по конструктивным соображениям.

Вид и прочность бетона также играют существенную роль. Высокопрочные бетоны, обладая большей плотностью, подвержены более интенсивному растрескиванию и сколам (спаллингу) при резком нагреве из-за высокого внутреннего парового давления и термических напряжений. Легкие бетоны с пористыми заполнителями, напротив, демонстрируют более высокую огнестойкость благодаря меньшей теплопроводности.

Характеристики арматуры, включая класс прочности, диаметр и схему армирования, определяют несущую способность конструкции при нагреве. Арматура из высокопрочной стали (HSS) обеспечивает более высокую начальную прочность, но быстрее теряет ее при длительном воздействии высокой температуры по сравнению с арматурой нормальной прочности (NSS). Применение композитной полимерной арматуры (GFRP, BFRP) требует отдельного рассмотрения, поскольку полимерная матрица размягчается при температурах значительно ниже критических для стали.

Наличие трещин в бетоне, особенно в растянутой зоне изгибаемых элементов, существенно снижает огнестойкость. Трещины служат каналами для проникновения тепла непосредственно к арматуре, минуя защитный слой бетона. В работе Васильченко А. и др. показано, что наличие открытых трещин может почти вдвое уменьшить предел огнестойкости изгибаемых железобетонных конструкций. Развитие трещин при нагреве происходит в зависимости от соотношения критических температур бетона и арматуры и может быть связано как с деградацией поверхностного слоя бетона, так и с достижением бетоном второй стадии напряженно-деформированного состояния.

Коррозионные повреждения арматуры и бетона являются еще одним фактором, значительно ухудшающим огнестойкость конструкций в процессе эксплуатации. Коррозия приводит к уменьшению сечения арматуры, появлению коррозионных трещин, которые облегчают теплопередачу и способствуют более раннему и интенсивному откалыванию защитного слоя. Экспериментальные исследования показали, что коррозия арматуры может снизить предел огнестойкости железобетонных колонн на 40–44 %

Методы повышения огнестойкости и восстановления конструкций

Для повышения огнестойкости железобетонных конструкций применяются различные методы. Наиболее распространенным является использование защитных штукатурных покрытий на основе вермикулита или перлита, которые обладают низкой теплопроводностью и обеспечивают эффективную теплоизоляцию арматуры. Эксперименты показывают, что применение таких покрытий может значительно снизить температуру арматуры, уменьшить потерю прочности и увеличить предел огнестойкости балок с 15 до 60 минут.

В качестве перспективных материалов для усиления и восстановления конструкций после пожара рассматриваются композитные материалы. Использование внешнего армирования в виде сеток из базальтопластика (BFRP) в сочетании с матрицей из высокопрочного цементного композита (ECC) позволяет повысить несущую способность поврежденных пожаром балок и восстановить их эксплуатационные характеристики. Также эффективно применение углепластиковых ламинатов (CFRP) для усиления огнестойких элементов.

Методы оценки и расчета огнестойкости

Определение предела огнестойкости железобетонных конструкций может осуществляться экспериментальными и расчетными методами. Экспериментальные методы, хотя и являются наиболее достоверными, требуют значительных материальных и временных затрат. В связи с этим все большее распространение получают расчетные методы, базирующиеся на решении теплотехнической и прочностной задач.

Решение теплотехнической задачи заключается в определении температурного поля в сечении конструкции при стандартном температурном режиме пожара с учетом нестационарного характера процессов теплообмена. Прочностная задача решается с использованием нелинейных деформационных моделей, которые позволяют оценить напряженно-деформированное состояние и несущую способность конструкции при нагреве с учетом изменения свойств материалов.

Разрабатываются также упрощенные методики, позволяющие оценить огнестойкость без проведения полномасштабных тепловых испытаний на основе единичных показателей качества бетона и арматуры. Эти методики применяются для оценки огнестойкости ребристых и безбалочных плит перекрытий, что значительно упрощает инженерные расчеты и снижает экономические затраты.

Численное моделирование методом конечных элементов, реализованное в программных комплексах (COMSOL, ABAQUS), является мощным инструментом для прогнозирования поведения конструкций при пожаре. Создаются термомеханические модели, учитывающие тепловое расширение, трещинообразование, изменение физико-механических свойств материалов и геометрические эффекты.

Перспективным направлением является применение методов машинного обучения, в частности, XGBoost, для прогнозирования остаточной прочности бетона и конструкций после воздействия высоких температур. Такие модели позволяют выявлять сложные нелинейные зависимости между параметрами состава бетона, условиями нагрева и конечными характеристиками материала.

Анализ современных исследований показывает, что обеспечение прочности и огнестойкости железобетонных конструкций требует комплексного подхода, учитывающего свойства материалов, конструктивные особенности, реальные условия эксплуатации и характер возможного пожара. Традиционные подходы, основанные на определении предела огнестойкости для неповрежденных конструкций, должны быть дополнены методами, позволяющими оценивать влияние таких факторов, как коррозия, трещинообразование и использование новых видов армирования. Перспективными направлениями являются разработка нелинейных деформационных моделей, численное моделирование и применение методов машинного обучения для прогнозирования поведения конструкций при пожаре. Важной задачей остается совершенствование нормативной базы, учитывающей широкий спектр современных материалов и конструктивных решений, а также разработка эффективных и экономически обоснованных методов усиления и восстановления конструкций после пожарных воздействий.

Литература

1. Thermal and dynamic response of hybrid fiber-reinforced concrete to fire exposure: Experimental and computational approaches // Construction and Building Materials. – 2025. – Vol. 425. – Art. 138921.
2. Изменение № 1 к СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности». – М. : Минстрой России, 2023.
3. Analytical and Experimental Behaviour of GFRP-Reinforced Concrete Columns under Fire Loading / A. Almerich-Chulia [et al.] // Journal of Composites Science. – 2024. – Vol. 8. – № 5. – 187 p.
4. Improving the post-fire performance of reinforced concrete beams with lightweight plaster / D.P. Thanaraj [et al.] // Case Studies in Construction Materials. – 2025. – Vol. 23. – Art. e04918.
5. Дубинская И.Ю. Определение предела огнестойкости железобетонных конструкций расчетными методами : магистерская диссертация. – Екатеринбург : УрФУ, 2024.
6. Shareef N.A. Simulation of shear strengthening fire-exposure high strength lightweight reinforced concrete beams using basalt fiber-reinforced polymer grid and engineered cementitious composites jacket / N.A. Shareef, M.M. Kadhum // Journal of Building Pathology and Rehabilitation. – 2024. – Vol. 9. – Art. 120.
7. Flexural performance of reinforced concrete beams exposed to uncontrolled fire with and without plaster protection // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. 27986.
8. Assessment of the Influence of Features of Crack Formation in Reinforced Concrete Products on their Fire Resistance / A. Vasilchenko [et al.] // Defect and Diffusion Forum. – 2024. – Vol. 435. – P. 61–68.
9. Ilyin N.A. New in assessing the fire resistance of reconstructed reinforced concrete ribbed building panel / N.A. Ilyin, S.S. Mordovsky, A.A. Korunov // Urban construction and architecture. – 2024. – Vol. 14. – № 3. – P. 4–10.
10. Thermomechanical performance of reinforced concrete beams with normal and high strength steel reinforcements under fire exposure: a FEA-based comparative study // Journal of Structural Fire Engineering. – 2025. (In Press).
11. An innovation in the method of assessing the fire resistance of a reinforced concrete girderless ceiling of a building / N.A. Ilyin [et al.] // Urban construction and architecture. – 2024. – Vol. 14. – № 3. – P. 11–18.
12. Fire performance of aged and corroded reinforced concrete columns // Journal of Building Engineering. – 2024. – Vol. 95. – Art. 110176.

References

1. Thermal and dynamic response of hybrid fiber-reinforced concrete to fire exposure: Experimental and computational approaches // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 425. Art. 138921.
2. Amendment № 1 to SP 468.1325800.2019 «Concrete and reinforced concrete structures. Rules for fire resistance and fire safety». – M. : Ministry of Construction of Russia, 2023.
3. Analytical and Experimental Behaviour of GFRP-Reinforced Concrete Columns under Fire Loading / A. Almerich-Chulia [et al.] // Journal of Composites Science. – 2024. – Vol. 8. – № 5. – 187 p.
4. Improving the post-fire performance of reinforced concrete beams with lightweight plaster / D.P. Thanaraj [et al.] // Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 23. Art. e04918.
5. Dubinskaya I.Yu. Determination of the fire resistance limit of reinforced concrete structures by calculation methods : master's thesis. – Yekaterinburg : UrFU, 2024.
6. Shareef N.A. Simulation of shear strengthening fire-exposure high strength lightweight reinforced concrete beams using basalt fiber-reinforced polymer grid and engineered cementitious composites jacket / N.A. Shareef, M.M. Kadhum // Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2024. Vol. 9. Art. 120.
7. Flexural performance of reinforced concrete beams exposed to uncontrolled fire with and without plaster protection // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Art. 27986.
8. Assessment of the Influence of Features of Crack Formation in Reinforced Concrete Products on their Fire Resistance / A. Vasilchenko [et al.] // Defect and Diffusion Forum. – 2024. – Vol. 435. – P. 61–68.
9. Ilyin N.A. New in assessing the fire resistance of reconstructed reinforced concrete ribbed building panel / N.A. Ilyin, S.S. Mordovsky, A.A. Korunov // Urban construction and architecture. – 2024. – Vol. 14. – № 3. – P. 4–10.
10. Thermomechanical performance of reinforced concrete beams with normal and high strength steel reinforcements under fire exposure: a FEA-based comparative study // Journal of Structural Fire Engineering. 2025. (In Press).
11. An innovation in the method of assessing the fire resistance of a reinforced concrete girderless ceiling of a building / N.A. Ilyin [et al.] // Urban construction and architecture. – 2024. – Vol. 14. – № 3. – P. 11–18.
12. Fire performance of aged and corroded reinforced concrete columns // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 95. Art. 110176.

УДК 539.4

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОРСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

♦♦♦♦♦

MODERN METHODOLOGICAL APPROACHES TO ASSESSING THE DURABILITY OF MARINE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Усанов Сергей Владимирович
кандидат технических наук,
доцент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
svusanov@gmail.com

Гридунов Александр Владимирович
студент кафедры промышленного
и гражданского строительства,
Кубанский государственный технологический университет
Alexraise2022@gmail.com

ннотация. В статье представлен системный анализ современных методов оценки долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в морской среде. Рассмотрены основные механизмы деградации, включая хлоридную коррозию арматуры, карбонизацию бетона, абразионный и эрозионный износ, а также их синергическое взаимодействие. Показано, что традиционные детерминистические подходы к проектированию, основанные на нормативных предписаниях, не в полной мере учитывают пространственную изменчивость параметров среды и материала, что ограничивает их применимость для объектов с повышенными требованиями к долговечности. Обоснована необходимость перехода к вероятностным методам проектирования на уровне элемента, которые позволяют оценивать риск поверхностных повреждений и принимать обоснованные решения о сроках обслуживания и ремонта. Особое внимание уделено роли микроклиматических условий в прибрежной зоне, а также перспективным направлениям исследований, включая мультимасштабное моделирование, применение методов искусственного интеллекта и разработку коррозионностойких составов бетона с наномодификаторами и фиброй.

Ключевые слова: долговечность, морские железобетонные конструкции, хлоридная коррозия, вероятностное проектирование, микроклимат, мультимасштабное моделирование, коррозионная стойкость, срок службы, защитный слой бетона, пространственная изменчивость.

Usanov Sergey Vladimirovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
svusanov@gmail.com

Gridunov Alexander Vladimirovich
Student at the Department
of Industrial and Civil Engineering,
Kuban State Technological University
Alexraise2022@gmail.com

Annotation. The article presents a systematic analysis of modern methods for assessing the durability of reinforced concrete structures operating in a marine environment. The main degradation mechanisms are considered, including chloride corrosion of reinforcement, carbonation of concrete, abrasion and erosion wear, as well as their synergistic interaction. It has been shown that traditional deterministic design approaches based on regulatory requirements do not fully take into account the spatial variability of environmental and material parameters, which limits their applicability to objects with increased durability requirements. The need to switch to probabilistic design methods at the element level is substantiated; these methods make it possible to assess the risk of surface damage and make informed decisions regarding maintenance and repair schedules. Special attention is paid to the role of microclimatic conditions in the coastal zone, as well as to promising research areas, including multiscale modeling, the use of artificial intelligence methods, and the development of corrosion-resistant concrete formulations with nanomodifiers and fiber.

Keywords: durability, marine reinforced concrete structures, chloride corrosion, probabilistic design, microclimate, multiscale modeling, corrosion resistance, service life, concrete protective layer, spatial variability.

Обеспечение долговременной эксплуатационной надежности железобетонных конструкций в морской среде представляет собой одну из наиболее сложных и актуальных задач современного строительства. Морские гидротехнические сооружения, портовые причалы, мосты и объекты шельфовой инфраструктуры подвергаются комплексному воздействию агрессивных факторов: хлоридной агрессии, циклическому увлажнению и высыханию, температурным колебаниям, ледовым нагрузкам и абразионному износу. В последние десятилетия требования к сроку службы таких объектов существенно возросли и составляют 60–100 и более лет, что стимулирует развитие новых подходов к проектированию и оценке долговечности.

Традиционный нормативный подход, основанный на принципе «надлежащего исполнения» (deemed-to-satisfy), предписывает конкретные требования к толщине защитного слоя и составу бетонной смеси. Данный метод хорошо зарекомендовал себя для умеренных условий эксплуатации, однако его эффективность снижается в агрессивной морской среде, особенно при повышенных требованиях к долговечности. В этой связи все большее распространение получают вероятностные методы расчета, учитывающие стохастическую природу процессов деградации и позволяющие количественно оценивать риск достижения предельных состояний.

Основные механизмы деградации и их синергия

Деградация морских железобетонных конструкций обусловлена совокупностью физических, химических и механических процессов. Хлоридная коррозия арматуры является доминирующим механизмом разрушения в морской среде. Проникновение хлорид-ионов через поровое пространство бетона к поверхности арматуры приводит к депассивации защитной оксидной пленки и инициирует электрохимическую коррозию. Время до начала коррозии определяется скоростью транспорта хлоридов и критическим пороговым значением их концентрации у поверхности арматуры, которое, в свою очередь, зависит от состава бетона, его водопроницаемости и микроклиматических условий.

Важно подчеркнуть, что процессы транспорта хлоридов и коррозионные явления существенно различаются в зависимости от зоны экспозиции: подводной, приливно-отливной, брызговой и атмосферной. Наиболее интенсивная деградация наблюдается в зоне переменного увлажнения, где циклическое высыхание и насыщение бетона ускоряют диффузию солей и создают условия для концентрации напряжений. В зоне брызг и приливов коррозия арматуры развивается наиболее активно, что подтверждается результатами численного моделирования, показывающими, что именно в этих зонах сосредоточена потеря жесткости и снижение несущей способности конструкций.

Дополнительным осложняющим фактором является наличие инкубационного (скрытого) периода большинства коррозионно-активных процессов, в течение которого визуальные признаки деградации отсутствуют, а дефекты могут быть идентифицированы только с помощью трудоемких методов неразрушающего контроля. Это создает иллюзию сохранности конструкции и повышает риски внезапного отказа.

Помимо хлоридной агрессии, существенный вклад в деградацию вносят карбонизация бетона, вызывающая снижение щелочности поровой жидкости, а также абразионный и эрозионный износ, обусловленный воздействием взвешенных наносов и ледовых образований. При этом различные механизмы деградации проявляют синергетический эффект, усиливая друг друга. Например, карбонизация увеличивает проницаемость бетона, что ускоряет проникновение хлоридов, а механические повреждения защитного слоя создают дополнительные пути для миграции агрессивных агентов.

Эволюция методов расчета долговечности

Традиционный подход к обеспечению долговечности, реализованный в большинстве нормативных документов, основан на детерминистической модели, где все параметры (коэффициент диффузии, толщина защитного слоя, пороговая концентрация хлоридов) принимаются как постоянные величины. Как показывают исследования, данный метод не учитывает пространственную изменчивость свойств материалов и внешней среды, что может приводить к недооценке рисков локальных повреждений.

В ответ на эти ограничения была разработана концепция вероятностного проектирования долговечности, впервые реализованная в ряде международных норм (fib, DuraCrete, Eurocode). В рамках этого подхода параметры долговечности рассматриваются как случайные величины, а предельное состояние определяется моментом инициации коррозии арматуры. Однако, как отмечается в современных критических работах, этот «материальный» уровень проектирования ориентирован на оценку риска коррозии в локальной точке на поверхности арматуры, тогда как эксплуатационные решения зачастую требуют информации о состоянии всей поверхности элемента или конструкции в целом.

В последние годы активно развиваются методы «элементного» (member-level) вероятностного проектирования, которые в качестве предельного состояния рассматривают поверхностные повреждения бетона (трещины, сколы, отслоения). Данный подход предполагает моделирование случайных полей для параметров долговечности, что позволяет имитировать пространственную картину деградации и оценивать такие показатели, как доля поврежденной поверхности, максимальная длина трещин и риск достижения различных степеней повреждения. Разработанные вычислительные инструменты позволяют не только верифицировать проектные решения, но и оптимизировать стратегии технического обслуживания и ремонта на основе количественной оценки рисков.

Влияние микроклимата и состава бетона

Критическим фактором, определяющим достоверность прогнозов долговечности, является учет микроклиматических условий, характерных для конкретной строительной площадки. Как показано в обзорных работах, такие параметры, как температура, режим ветра, продолжительность циклов увлажнения-высыхания, интенсивность осадков и концентрация углекислого газа, оказывают комплексное влияние как на скорость транспорта хлоридов, так и на пороговое значение их концентрации, вызывающее коррозию. Большинство лабораторных экспериментов проводятся в изолированных условиях, не воспроизводящих эту сложную картину взаимодействий, что затрудняет экстраполяцию результатов на реальные условия эксплуатации. В этой связи исследователи призывают к стандартизации экспериментальных методик, учитывающих микроклиматические факторы.

Альтернативные вяжущие вещества и добавки представляют собой перспективное направление повышения долговечности. Однако, как подчеркивается в современных обзорах, для большинства новых составов (золошлаковые смеси, щелочеактивированные вяжущие) понимание рисков хлоридной коррозии остается ограниченным, что требует дополнительных исследований.

Перспективные направления исследований

Развитие методологии оценки долговечности морских железобетонных конструкций идет по нескольким магистральным направлениям. Мультимасштабное мультифизическое моделирование позволяет интегрировать процессы, протекающие на различных уровнях – от наноструктуры цементного камня до макроскопического поведения элемента. Такой подход дает возможность более точно прогнозировать эволюцию свойств материалов во времени и планировать ремонтные воздействия, снижая затраты на техническое обслуживание в течение всего жизненного цикла.

Применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта открывает новые возможности для обработки больших массивов данных мониторинга и выявления сложных нелинейных зависимостей между условиями эксплуатации, составом материалов и темпами деградации. Разработка новых коррозионностойких сталей, в том числе легированных хромом, позволяет повысить порог инициации коррозии и увеличить срок службы конструкций.

Важным направлением является совершенствование методов расчета с учетом пространственной изменчивости коррозионных параметров. Работы последних лет показывают, что пренебрежение этой изменчивостью может приводить к существенным погрешностям при назначении стратегий технического обслуживания, основанных на управлении рисками.

Обеспечение долговечности морских железобетонных конструкций требует перехода от детерминистических нормативных предписаний к вероятностным методам проектирования, учитывающим стохастическую природу процессов деградации и пространственную изменчивость параметров. Наиболее перспективным является «элементный» уровень проектирования, оперирующий рисками поверхностных повреждений, и позволяющий принимать обоснованные решения об обслуживании и ремонте на протяжении всего жизненного цикла сооружения.

Критическим фактором, определяющим точность прогнозов, является учет микроклиматических условий и синергетического эффекта различных механизмов деградации. Дальнейшее развитие методологии связано с внедрением мультимасштабного моделирования, методов искусственного интеллекта и разработкой новых коррозионностойких материалов. Эти усилия направлены на создание научной основы для проектирования и эксплуатации морских гидротехнических сооружений с гарантированным сроком службы, превышающим 100 лет, что является насущной потребностью современной инфраструктурной отрасли.

Литература

1. Member-level probabilistic durability design of reinforced concrete structures in marine environment: Framework and general procedures / Z.W. Ye [et al.] // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 317. – Art. 120202.
2. Ким Л.В. Коррозия, эрозия и абразия морских железобетонных сооружений : монография. – М. : ИНФРА-М, 2025.
3. Das C.S., Zheng H., Dai J.G. A review of chloride-induced steel corrosion in coastal reinforced concrete structures: Influence of micro-climate // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 325. – Art. 120794.
4. Service life evaluation of marine reinforced concrete structures in coastal soda residue soil subjected to chloride attack / L. Wu [et al.] // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 457. – Art. 139222.
5. Усачев И.Н. Сверхдолговечный бетон и наплавной способ строительства – эффективные решения для развития инфраструктуры Северного морского пути / И.Н. Усачев, Н.К. Розенталь // Гидротехника. – 2025. – № 2. – С. 38–47.

6. Evaluating the importance of spatial variability of corrosion initiation parameters for the risk-based maintenance of reinforced concrete marine structures // Structural Safety. – 2025. – Vol. 115. – Art. 102568.
7. Structural stability and service life assessment of marine RC piles subjected to depth-dependent corrosion under lateral impacts / S.R.D. Annamalaisamy [et al.] // Ocean Engineering. – 2026. – Vol. 321. – Art. 120447.
8. Sustainability study of marine reinforced concrete bridge // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3005. – P. 1–13.
9. Melchers R.E. Time to initiation of reinforcement corrosion in marine environments – a review of older concrete structures / R.E. Melchers, C.Q. Li // Corrosion & Prevention Conference. – Newcastle, 2025. – Paper 037.
10. Corrosion resistance behavior of enhanced passivation Cr-modified rebars and their service life prediction based on Monte Carlo simulation // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 438. – Art. 137134.

References

1. Member-level probabilistic durability design of reinforced concrete structures in marine environment: Framework and general procedures / Z.W. Ye [et al.] // Ocean Engineering. 2025. Vol. 317. Art. 120202.
2. Kim L.V. Corrosion, erosion and abrasion of marine reinforced concrete structures : monograph. – M. : INFRA-M, 2025.
3. Das C.S. A review of chloride-induced steel corrosion in coastal reinforced concrete structures: Influence of micro-climate / C.S. Das, H. Zheng, J.G. Dai // Ocean Engineering. 2025. Vol. 325. Art. 120794.
4. Service life evaluation of marine reinforced concrete structures in coastal soda residue soil subjected to chloride attack / L. Wu [et al.] // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 457. Art. 139222.
5. Usachev I.N. Ultra-durable concrete and floating construction method – effective solutions for developing the infrastructure of the Northern Sea Route / I.N. Usachev, N.K. Rosenthal // Hydrotechnical Engineering. – 2025. – № 2. – P. 38–47.
6. Evaluating the importance of spatial variability of corrosion initiation parameters for the risk-based maintenance of reinforced concrete marine structures // Structural Safety. 2025. Vol. 115. Art. 102568.
7. Structural stability and service life assessment of marine RC piles subjected to depth-dependent corrosion under lateral impacts / S.R.D. Annamalaisamy [et al.] // Ocean Engineering. 2026. Vol. 321. Art. 120447.
8. Sustainability study of marine reinforced concrete bridge // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3005. – P. 1–13.
9. Melchers R.E. Time to initiation of reinforcement corrosion in marine environments – a review of older concrete structures / R.E. Melchers, C.Q. Li // Corrosion & Prevention Conference. – Newcastle, 2025. – Paper 037.
10. Corrosion resistance behavior of enhanced passivation Cr-modified rebars and their service life prediction based on Monte Carlo simulation // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 438. Art. 137134.

УДК 691.327

ВЛИЯНИЕ КАВИТАЦИОННО АКТИВИРОВАННЫХ ГЛИН НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

♦♦♦♦♦

EFFECT OF HYDRODYNAMICALLY ACTIVATED CLAY ADDITIVES ON THE STRENGTH OF CEMENT COMPOSITES

Чилингарян Ваган Эдмонович
аспирант кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
vagan.chilingaryan@mail.ru

Самандасюк Глеб Витальевич
ассистент кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
Gleb6730@gmail.com

Минаков Василий Леонидович
Аспирант кафедры архитектуры гражданских
и промышленных зданий имени А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. В статье указаны результаты испытаний цементных композитов с тремя видами глинистых добавок, предварительно измельченных и диспергированных в водной среде методом гидродинамической активации. Исходные образцы глины СКВ2-2/1, СКВ2-2/10 и СКВ3-3/2 вводили в количестве 1 % от массы вяжущего. Прочность при сжатии и изгибе определяли в возрасте 1, 7 и 28 суток. Наиболее высокий результат по прочности при сжатии получен для СКВ2-2/10: к 28 суткам среднее значение составило 67,46 МПа при 67,28 МПа у контрольного состава. Для СКВ2-2/1 снижение относительно контроля составило 3,6 %, а для СКВ3-3/2 – 24,0 %. При изгибе ни одна из добавок не превысила контроль. Результаты показывают, что влияние включения глины зависит от ее вида, срока твердения и вида испытания.

Ключевые слова: цементный композит, глинистая добавка, гидродинамическая активация, диспергирование, прочность при сжатии, прочность при изгибе, кинетика твердения.

Chilingaryan Vagan Edmonovich
Postgraduate Student
at the Department of Architecture
of Civil and Industrial Buildings
named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
vagan.chilingaryan@mail.ru

Samandasyuk Gleb Vitalievich
Assistant of the Department
of Architecture of Civil
and Industrial Buildings
named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
Gleb6730@gmail.com

Minakov Vasily Leonidovich
Postgraduate Student
of the Department of Architecture
of Civil and Industrial Buildings
named After A.V. Titov
Kuban State Technological University

Annotation. The paper presents an experimental study of three clay additives preliminarily ground and dispersed in an aqueous medium by hydrodynamic activation. Clays SKV2-2/1, SKV2-2/10 and SKV3-3/2 were introduced at 1 % by cement mass. Compressive and flexural strengths were determined after 1, 7 and 28 days. The effect depended on clay type, curing age and loading mode. The highest 28-day compressive strength was obtained with SKV2-2/10: 67.46 MPa, corresponding to the control value of 67.28 MPa. SKV2-2/1 was 3.6 % below the control, whereas SKV3-3/2 showed a persistent negative effect. None of the additives exceeded the control in flexural strength. The results confirm the need to evaluate compressive and flexural behavior separately and support further control of the dispersion state of clay modifiers.

Keywords: cement composite, clay additive, hydrodynamic activation, dispersion, compressive strength, flexural strength, strength development.

Введение

Применение тонкодисперсных минеральных добавок является одним из способов регулирования структуры и свойств цементных материалов. Глинистые минералы отличаются развитой поверхностью, чешуйчатым строением и способностью взаимодействовать с жидкой фазой цементной системы. Их влияние определяется не только химико-минералогическим составом и дозировкой, но также дисперсностью, степенью агрегации и равномерностью распределения в цементной матрице [1, 2].

По данным [1–5], небольшие количества нано- и тонкодисперсных глинистых частиц могут изменять гидратацию, поровую структуру и прочность цементных композитов. Однако результаты зависят от конкретной глины и способа ее подготовки. Положительное действие обычно связывают с заполнением пор, образованием дополнительных центров кристаллизации

и возможным пуццолановым взаимодействием. При агломерации частиц и увеличении водопотребности эффект может оказаться отрицательным.

Одним из технологических способов изменения состояния минеральной суспензии является гидродинамическая активация. Такое воздействие сопровождается интенсивным перемешиванием, измельчением и диспергированием твердой фазы в воде. Для цементно-водных систем установлено влияние гидромеханической обработки на реологические характеристики, гидратацию и кинетику формирования прочности, а кавитационные технологии применяют для диспергирования и гомогенизации суспензий [6–8]. В целях достоверности информации, воздействие конкретного образца глины в качестве минеральной добавки должно учитываться экспериментально, так как минералогический состав, степень агрегации и другие физические характеристики исходной глины могут приводить к различному результату.

В работе приведены результаты завершённой серии испытаний бетонных образцов, изготовленных с применением трёх видов гидродинамически активированных глин. Сопоставлялась прочность при сжатии и изгибе в ранние и поздние сроки твердения.

Цель исследования

Целью работы является установление влияния гидродинамически активированной глинистой добавки на прочность цементных композитов при сжатии и изгибе в зависимости от вида глины в возрасте 1, 7 и 28 суток, а также выявление наиболее перспективного материала для дальнейшего совершенствования технологии подготовки добавки.

Материалы и методы

Исследованы четыре состава: контрольный цементно-песчаный состав без глины и три состава с добавками СКВ2-2/1, СКВ2-2/10 и СКВ3-3/2. Содержание глины составляло 1 % от массы цемента.

Модуль крупности применявшегося песка, рассчитанный по результатам ситового анализа, составил 2,25.

До гидродинамической обработки удельную поверхность сухих глин определяли методом воздухопроницаемости на приборе ПСХ-10аК [9]. При принятой плотности порошка 2,40 г/см^3 средние значения по двум измерениям для СКВ2-2/1, СКВ2-2/10 и СКВ3-3/2 составили соответственно 894,5; 1236,5 и 1360,5 см^2/г.

Перед введением в цементную систему глины обрабатывали в водной среде методом гидродинамической активации в кавитационной мельнице (рис. 1). Обработка сопровождалась измельчением и диспергированием частиц. Поэтому полученные результаты характеризуют действие не исходной сухой глины, а предварительно подготовленной глинистой суспензии.

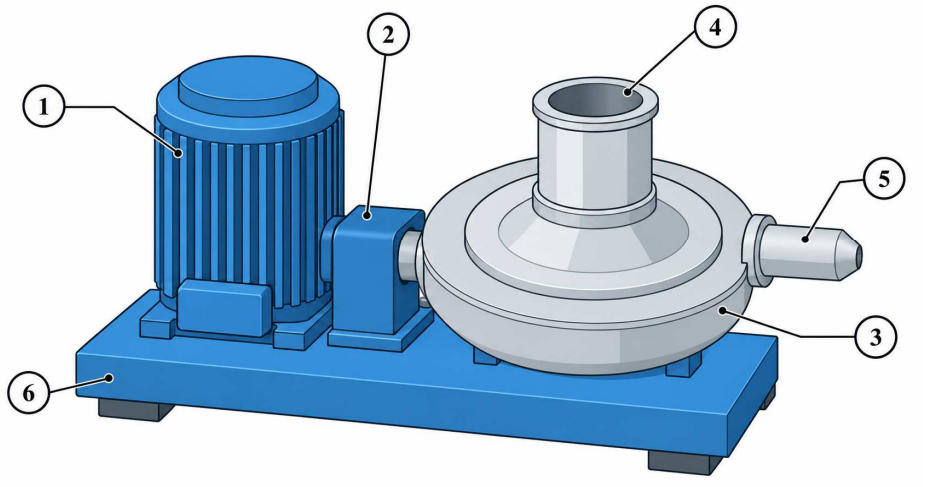


Рисунок 1 – Схема общего вида кавитационной мельницы:
1 – электродвигатель; 2 – приводной блок; 3 – рабочая камера;
4 – загрузочная горловина; 5 – боковой штуцер; 6 – основание

Для всех составов сохраняли водоцементное отношение 0,45. При нормировании на единицу массы цемента соотношение цемента, песка и воды составляло приблизительно 1:3:0,45. Дозировка поликарбоксилатной добавки Melflux 1641F составляла около 0,5 % от массы цемента. Прочность при сжатии и изгибе определяли в возрасте 1, 7 и 28 суток. В таблицах приведены средние значения результатов испытаний.

Результаты исследования

Прочность при сжатии

Таблица 1 – Средняя прочность цементных композитов при сжатии

Состав	1 сут., МПа	7 сут., МПа	28 сут., МПа	Изменение к контролю в 28 сут., %
Контрольный	20,76	60,40	67,28	–
СКВ2-2/1	18,15	50,72	64,87	-3,6
СКВ2-2/10	17,44	40,57	67,46	+0,3
СКВ3-3/2	16,98	44,68	51,14	-24,0

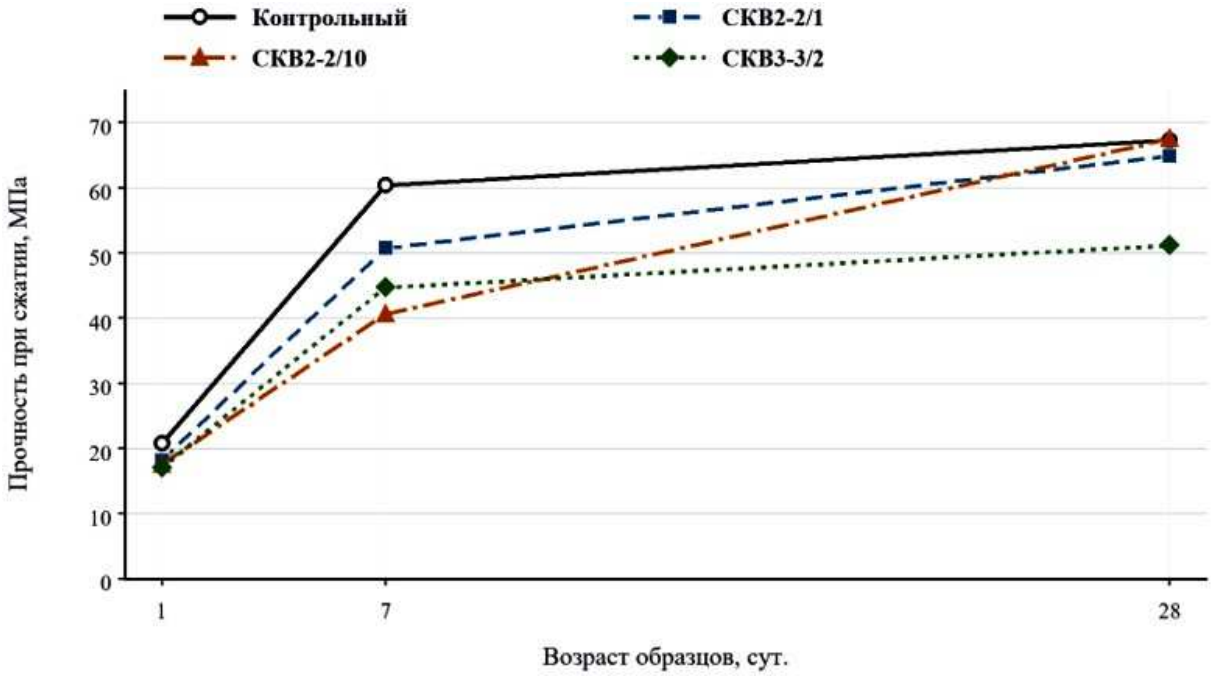


Рисунок 2 – Изменение прочности цементных композитов при сжатии в возрасте 1, 7 и 28 суток

В возрасте 1 суток все составы с глиной имели меньшую прочность при сжатии по сравнению с контролем. Снижение составляло 12,6 % для СКВ2-2/1; 16,0 % для СКВ2-2/10 и 18,2 % для СКВ3-3/2. В возрасте 7 суток различия усилились: значения опытных составов были ниже контрольного на 16,0; 32,8 и 26,0 % соответственно.

К 28 суткам характер результатов изменился. Прочность состава СКВ2-2/1 достигла 64,87 МПа, что на 3,6 % ниже контроля. Наиболее высокий результат получен для СКВ2-2/10 – 67,46 МПа при контрольном значении 67,28 МПа. Номинальная разница составляет 0,3 %, поэтому верно утверждать о достижении прочности уровня контрольного образца, а не о доказательстве упрочнения.

Состав СКВ2-2/10 обладает наиболее выраженным поздним набором прочности. Между 7 и 28 сутками его прочность увеличилась на 66,3 %, тогда как у контрольного состава прирост за тот же период составил 11,4 %. Для СКВ3-3/2 позднего восстановления не произошло: к 28 суткам прочность составила 51,14 МПа и оставалась на 24,0 % ниже контроля.

Прочность при изгибе

Таблица 2 – Средняя прочность цементных композитов при изгибе

Состав	1 сут., МПа	7 сут., МПа	28 сут., МПа	Изменение к контролю в 28 сут., %
Контрольный	6,13	8,95	11,01	–
СКВ2-2/1	5,31	8,90	9,22	–16,3
СКВ2-2/10	5,19	8,28	8,62	–21,7
СКВ3-3/2	5,19	7,73	6,96	–36,8

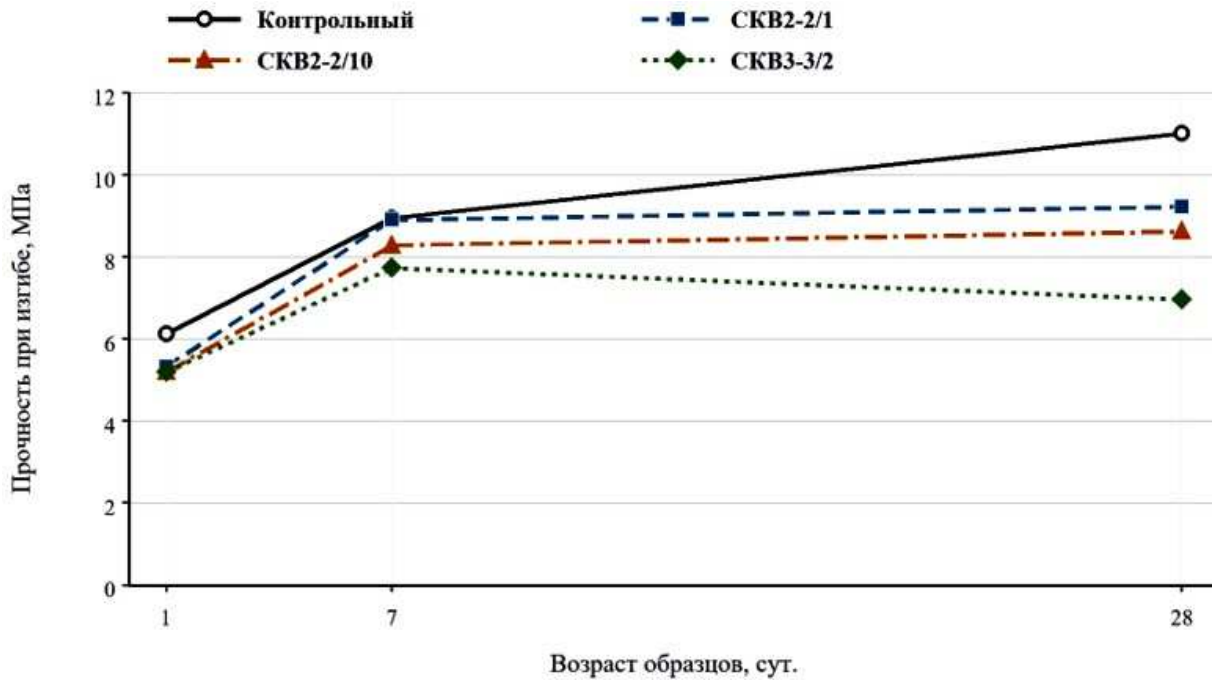


Рисунок 3 – Изменение прочности цементных композитов при изгибе в возрасте 1, 7 и 28 суток

При изгибе ни одна из исследованных глин не обеспечила превышения контрольных значений. Наиболее близкий к контролю результат в возрасте 7 суток получен для СКВ2-2/1: 8,90 МПа при 8,95 МПа у контрольного состава. К 28 суткам прочность этого состава составила 9,22 МПа и была ниже контроля на 16,3 %.

Для СКВ2-2/10 прочность при изгибе к 28 суткам составила 8,62 МПа, что на 21,7 % ниже контроля. СКВ3-3/2 показала наиболее значительное снижение – до 6,96 МПа, или на 36,8 %. Однако прочность при сжатии для СКВ2-2/10, аналогичная контрольному образцу, не имела подобного результата при изгибе.

Обсуждение результатов

При одинаковой дозировке и общей технологии подготовки три глины показали разную скорость твердения. Из этого следует, что одного параметра количественного содержания добавки недостаточно для оценки ее эффективности. Требуется учитывать минералогический состав, физические характеристики частиц глины после гидродинамической активации. Помимо прочего, глинистые частицы различного состава могут по-разному проявлять свойства в среде поликарбоксилатного суперпластификатора [10], что в свою очередь может повлиять на полученные результаты.

Наиболее перспективной в выполненном эксперименте является образец глины СКВ2-2/10. Отставание в возрасте 7 суток и достижение контрольного уровня прочности при сжатии к 28 суткам указывают на замедленный характер процессов структурообразования. Причинами проявления данных свойств могут как быть постепенное вовлечение поверхности частиц во взаимодействие с продуктами гидратации, так и образование дополнительных центров кристаллизации [2–5].

Отдельного внимания требует различие результатов при сжатии и изгибе. Для СКВ2-2/10 прочность при сжатии к 28 суткам достигла контрольного уровня, тогда как прочность при изгибе осталась ниже на 21,7 %. Можно предположить, что включение добавки в большей степени оказало влияние на восприятие сжимающих усилий, чем на сопротивление развития трещин.

Образец СКВ2-2/1 проявил себя более стабильно: отставание от контроля снижалось по мере твердения и к 28 суткам стало сравнительно небольшим. Глина СКВ3-3/2 в рамках эксперимента не обеспечила восстановления ни прочности при сжатии, ни прочности при изгибе.

Практический потенциал показал поздний набор прочности СКВ2-2/10. До активации удельная поверхность этой глины составляла 1236,5 см²/г: значение было выше, чем у СКВ2-2/1 (894,5 см²/г), но ниже, чем у СКВ3-3/2 (1360,5 см²/г). При этом наибольшая исходная удельная поверхность не соответствовала наибольшей прочности: состав с СКВ3-3/2 показал минимальные значения. Следовательно, удельную поверхность сухого порошка нельзя рассматривать как самостоятельный критерий эффективности добавки. Для объяснения различий необходимы данные о состоянии частиц после активации, гранулометрии, минералогическом составе и микроструктуре цементного камня.

Опытные образцы при определении прочности при изгибе визуально показали более пластический характер разрушения, в отличие от контрольного.

Перспективным направлением последующего исследования является дополнительное повышение дисперсности глинистых добавок с применением физических методов активации, включая ультразвуковое воздействие. Методика такой обработки и оценка ее влияния на свойства цементных композитов составляют предмет отдельного исследования.

Выводы

1. Установлено существенное влияние вида гидродинамически активированной глины на скорость формирования прочности цементного композита при содержании добавки 1 % от массы цемента.

2. Наиболее высокий результат по прочности при сжатии получен для СКВ2-2/10. Несмотря на снижение относительно контроля на 32,8 % в возрасте 7 суток, к 28 суткам прочность достигла 67,46 МПа и соответствовала контрольному значению 67,28 МПа.

3. СКВ2-2/1 к 28 суткам обеспечила 64,87 МПа при сжатии, что на 3,6 % ниже контроля. СКВ3-3/2 сохраняла отрицательное влияние и обеспечила 51,14 МПа, что ниже контроля на 24,0 %.

4. Положительного эффекта по прочности при изгибе в исследованной серии не выявлено. Для СКВ2-2/10 при достижении контрольного уровня прочности при сжатии прочность при изгибе была ниже контроля на 21,7 %.

5. Выявленная разница между сжатием и изгибом показывает необходимость комплексной оценки механических характеристик и не позволяет делать выводы об эффективности глины только по одному виду испытаний.

6. Удельная поверхность сухих глин до гидродинамической обработки составила 894,5–1360,5 см²/г, однако ее наибольшее значение не сопровождалось повышением прочности. Для оценки влияния дисперсности необходимо исследовать состояние частиц после активации и их распределение в цементной системе.

Литература

1. A review of the effect of nanoclays on the fresh and hardened properties of cement-based materials / S. Kawashima [et al.] // Cement and Concrete Research. – 2021. – Vol. 147. – Art. 106502. – DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106502
2. Properties of cement-based materials incorporating nano-clay and calcined nano-clay: A review / X.-J. Niu [et al.] // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 284. – Art. 122820. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122820
3. Irshidat M.R. Influence of Nanoclay on the Properties and Morphology of Cement Mortar / M.R. Irshidat, M.H. Al-Saleh // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2018. – Vol. 22. – № 10. – P. 4056–4063. – DOI: 10.1007/s12205-018-1642-x
4. Hakamy A. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites / A. Hakamy, F.U.A. Shaikh, I.M. Low // Composites Part B: Engineering. – 2015. – Vol. 78. – P. 174–184. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.074
5. Нуцкова М.В. Разработка тампонажных растворов с добавками частиц наноглины для строительства нефтяных скважин в условиях повышенных температур / М.В. Нуцкова, М. Алхаззаа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 7–17. – DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4244
6. Investigation of rheo-mechanical properties of cement suspensions activated in a hydrodynamic cavitator / V. Martyntsev [et al.] // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – Vol. 6. – № 3(38). – P. 18–25. – DOI: 10.15587/2312-8372.2017.119479
7. Ибрагимов Р.А. Влияние механохимической активации на особенности процессов гидратации цемента / Р.А. Ибрагимов, С.И. Пименов // Инженерно-строительный журнал. – 2016. – № 2(62). – С. 3–12. – DOI: 10.5862/MCE.62.1
8. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) / А.Ю. Радзюк [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 209–218. – DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623
9. Носенко А.А. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов / А.А. Носенко, С.И. Половнева // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 113–121. – DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121
10. Хицков А.А. Влияние глинистых частиц различных песков на эффективность поликарбоксилатных суперпластификаторов и свойства цементного камня / А.А. Хицков, И.М. Иванов, Л.Я. Крамар // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 6(80). – С. 102–114.

References

1. A review of the effect of nanoclays on the fresh and hardened properties of cement-based materials / S. Kawashima [et al.] // Cement and Concrete Research. 2021. Vol. 147. Art. 106502. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106502
2. Properties of cement-based materials incorporating nano-clay and calcined nano-clay: A review / X.-J. Niu [et al.] // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 284. Art. 122820. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122820
3. Irshidat M.R. Influence of Nanoclay on the Properties and Morphology of Cement Mortar / M.R. Irshidat, M.H. Al-Saleh // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2018. – Vol. 22. – № 10. – P. 4056–4063. DOI: 10.1007/s12205-018-1642-x
4. Hakamy A. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites / A. Hakamy, F.U.A. Shaikh, I.M. Low // Composites Part B: Engineering. – 2015. – Vol. 78. – P. 174–184. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.03.074
5. Nutskova M.V. Development of cement slurries with additives of nanoclay particles for the construction of oil wells at elevated temperatures / M.V. Nutskova, M. Alhazzaa // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2024. – Vol. 335. – № 8. – P. 7–17. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4244
6. Investigation of rheo-mechanical properties of cement suspensions activated in a hydrodynamic cavitator / V. Martyntsev [et al.] // Technology Audit and Production Reserves. – 2017. – Vol. 6. – № 3(38). – P. 18–25. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.119479
7. Ibragimov R.A. Influence of mechanochemical activation on the cement hydration features / R.A. Ibragimov, S.I. Pimenov // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – № 2(62). – P. 3–12. DOI: 10.5862/MCE.62.1
8. The current state of the use of cavitation technologies (brief review) / A.Yu. Radzyuk [et al.] // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2022. – Vol. 333. – № 9. – P. 209–218. DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3623
9. Nosenko A.A. Methods and devices for measuring the specific surface area of dispersed materials / A.A. Nosenko, S.I. Polovneva // Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. – 2017. – Vol. 7. – № 2. – P. 113–121. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-113-121
10. Hickov A.A. Influence of clay particles of various sands on the effectiveness of polycarboxylate superplasticizers and the properties of cement stone / A.A. Hickov, I.M. Ivanov, L.Ya. Kramar // Building and Reconstruction. – 2018. – № 6(80). – P. 102–114.

УДК 691.328:620.193

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОРРОЗИОННЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ЗАЩИТНОМ СЛОЕ БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ИХ ОТНОСИТЕЛЬНОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

♦♦♦♦♦

A METHODOLOGY FOR DETERMINING THE GEOMETRIC PARAMETERS OF CORROSIVE LONGITUDINAL CRACKS IN THE PROTECTIVE LAYER OF CONCRETE IN REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND THEIR RELATIVE KINETIC IMPACT ON THE TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Шамшина Ксения Викторовна
соискатель кафедры мосты и тоннели
Тюменский индустриальный университет;
Управление делами губернатора
и Правительства Пензенской области
viktor5043@rambler.ru

Овчинников Игорь Георгиевич
доктор технических наук,
профессор кафедры мосты и тоннели,
Тюменский индустриальный университет
bridgesar@mail.ru

Аннотация. Представлены новая методика измерения геометрических параметров коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона железобетонных конструкций, благодаря принятию интегрального параметра совокупного их определения, а также экспериментальные результаты изменения их кинетики во времени, с учётом статистического расчётного обоснования.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, защитный слой бетона, арматура, хлоридная среда, коррозия арматуры, ширина, длина и интегральный параметр коррозионных продольных трещин, кинетика изменения их во времени.

Shamshina Ksenia Viktorovna
Applicant at the Department
of Bridges and Tunnels,
Tyumen Industrial University
Office of the Governor and Government
of the Penza Region
viktor5043@rambler.ru

Ovchinnikov Igor Georgievich
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department
of Bridges and Tunnels
Tyumen Industrial University
bridgesar@mail.ru

Annotation. A new method for measuring the geometric parameters of corrosive longitudinal cracks in the protective layer of concrete in reinforced concrete structures is presented, thanks to the adoption of an integral parameter for their comprehensive assessment, as well as experimental results showing how their kinetics change over time, taking into account the statistical calculation justification.

Keywords: reinforced concrete structures, protective concrete layer, reinforcement, chloride environment, corrosion of reinforcement, width, length, and integral parameter of corrosive longitudinal cracks, kinetics of their change over time.

Воздействию хлоридсодержащих сред подвергаются до 75 % инженерных конструкций на предприятиях в различных отраслях промышленности и, особенно, в транспортных сооружениях из-за их присутствия в химических средствах борьбы с гололёдом, и в воздушной городской промышленной атмосфере в виде тумана [1].

Хлориды вызывают коррозию бетона и, главным образом, металлическую арматуру. В результате давления её продуктов коррозии, имеющих значительно больший объём, чем объём исходного металла, на бетон защитного слоя в нём образуются продольные трещины на его поверхности вдоль арматуры. Растягивающие напряжения в бетоне от давления на него продуктов коррозии стали изменяются от 148 кг/см2 [2] до 300 кг/см^2 [3].

Опасность хлоридной коррозии арматуры значительно возрастает после карбонизации бетона в зоне продольной трещины, так как первоначально связанные хлориды при карбонизации освобождаются и увеличивают количество свободных к стали хлоридов [4].

Объективной характеристикой изменения технического состояния железобетонных конструкций при коррозии арматуры являются внешние признаки нарушения сплошности бетона, проявляющиеся на поверхности конструкции. Возникновение первых (волосяных) коррозионных трещин наблюдается уже при потере сечения арматуры более 0,5 % [5]. Эксплуатация железобетонных конструкций в агрессивной среде с 15 % значением сниж ения диаметра несущей арматуры приводит к потере их несущей способности [6].

Поэтому использование методики инструментального измерения ширины и длины раскрытия коррозионных продольных трещин является наиболее доступным и эффективным средством оценки технического состояния железобетонных конструкций [7, 8].

Влияние продольных трещин в защитном слое бетона на изменение несущих и деформационных свойств в нормативных документах не отражено [9, 10, 11]. В тоже время в имеющейся научной литературе подчёркивается опасное влияние коррозионных продольных трещин на долговечность железобетонных конструкций. Научные данные диссертации [12] свидетельствуют, что возникающие коррозионные продольные трещины в защитном слое бетона в изгибаемых железобетонных элементах из тяжёлого бетона без предварительного напряжения приводят к снижению сцепления арматуры с бетоном не менее 70 % от первоначального её значения, а также несущей способности нормальных сечений железобетонных конструкций до 30 %. Одновременно, образование коррозионных продольных трещин шириной более 100 мкм в защитном слое бетона приводит изгибаемые железобетонные конструкции в предаварийное состояние [4].

Объективные результаты коррозионного поражения железобетонных элементов на изменение их трещиностойкости получаются только на прямых моделях железобетонных конструкций при испытании не менее шести опытных образцов [1].

В данной работе представлен новый подход к методике определения геометрических параметров коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона, благодаря принятию интегрального параметра, учитывающего все дифференцированные длины участков этих трещин с равными значениями ширины их раскрытия на поверхности бетона, который позволяет качественно, и в какой-то мере количественно, учитывать все количественные их значения на снижение сцепления бетона с арматурой и уменьшение её диаметра.

Интегральный параметр (ИП) в пределах дифференцированного участка коррозионной продольной трещины определяется как произведение ширины раскрытия трещины $a_т$ на её длину $\ell_т$ (ИП= ($a_т \cdot \ell_т$).

Разработанная методика апробирована на обычных железобетонных конструкциях, которые с 2010 года испытывались под открытым небом в климатических условиях г. Пензы.

По относительным геометрическим размерам, коэффициенту армирования, механическим характеристикам бетона и арматуры, а также по конструктивному армированию опытные железобетонные конструкции являются прямыми моделями железобетонных призматических и одноконсольных колонн [8].

Одноконсольные колонны в верхней и нижней частях имеют оносторнние консоли длиной 12 см. Общая длина образцов и размеры их поперечного сечения в центральной части соответственно составляют 100 см и 12 × 10 см с толщиной защитного слоя 15 мм. Модели армированы объёмным арматурным каркасом с несущей арматурой диаметром 8 мм класса А111 и распределительной с диаметром 5 мм класса $B_р$-1. Бетон изготовлен на портландцементе марки 400 и гранитном щебне фракции 5–10 мм с водоцементном отношением В/ц = о,45.

Для нейтрализации щелочи поровой влаги бетона и активизации коррозионного процесса на арматуре в бетонную смесь во время бетонирования вводились хлорид-ионы в виде добавки 5% Nacℓ [8].

В теплой период года железобетонные образцы не менее трех раз в сутки увлажнялись водопроводной водой. По интенсивности коррозионного поражения арматуры натурные условия испытания характеризуются как сильноагрессивные [13].

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что кинетика изменения интегрального параметра и длины дифференцированных участков коррозионных продольных трещин в защитном слое бетона имеет условную линейную зависимость от времени, а кинетика изменения ширины раскрытия этих трещин выражается четкой линейной зависимостью от времени, что указывает на не затухающий процесс коррозии арматуры в коррозионных продольных трещинах бетона.

Вероятностное статистическое распределение полученных данных выборок интегрального параметра и значений ширины и длины коррозионных продольных трещин описывается нормальным законом их распределения [14].

Следует отметить, что расчётные численные значения интегрального параметра позволяют сделать качественную оценку степени нарушения сцепления арматуры с бетоном.

Анализ кинетики величин математического ожидания $a_т$ и $\ell_т$, а также ИП во времени в соответствующих статистических выборках, представленных в таблицах 2, 3, 4 и 5, показывает изменение их значений по годам.

В таблицах 1, 2, 3, 4 и 5 приведены следующие условные обозначения: КК и КБ – соответственно модели колонн с консолями и без консолей; М – величина математического ожидания; σ – среднее квадратическое отклонение; А и Е показатели асимметрии и эксцесса теоретического распределения, где $\chi^2_{набл}$ и $\chi^2_{кр}$ теоретический и критический согласие Пирсона.

Таблица 1 – Количество измеренных дифференцированных участков с геометрическими параметрами коррозионных продольных трещин в соответствующих годах испытания образцов

Вид моделей	Кол-во моделей	Годы измерения	Кол-во измеренных коррозионных дифференцированных участков с $a_т$ и $\ell_т$, шт
КБ	23	2011-2012-2013	242-651-886
КК	27	2011-2012-2013	148-652-656

Таблица 2 – Результаты статистического расчёта распределения $a_т$ на одной усредненной грани моделей колонн

Вид моделей	Кол-во моделей	Год измерения	M, мм	σ, мм	A	E	$\chi^2_{набл}$	$\chi^2_{кр}$
КБ	17	2011	0,126	0,039	+0,097	–0,700	0,528	9,5
КБ	23	2012	0,619	0,138	+0,539	–0,900	2,115	16,9
КБ	23	2013	0,946	0,110	+0,481	–0,201	2,780	14,1
КК	24	2011	0,077	0,031	–0,030	0,872	1,575	6,0
КК	27	2012	0,372	0,095	–0,120	0,938	1,756	11,1
КК	27	2013	0,619	0,124	–0,208	0,547	1,789	15,5

Таблица 3 – Результаты статистического расчёта распределения $\ell_т$ на одной усредненной грани моделей колонн

Вид моделей	Кол-во моделей	Год измерения	M, мм	σ, мм	A	E	$\chi^2_{набл}$	$\chi^2_{кр}$
КБ	23	2011	9,77	1,80	–0,252	–0,500	1,059	11,1
КБ	23	2012	14,26	3,60	–0,150	+0,069	3,092	12,6
КБ	23	2013	17,60	3,87	+0,127	–0,414	1,188	12,6
КК	27	2011	5,61	2,53	+0,200	–0,628	1,267	15,5
КК	27	2012	12,89	3,54	–0,168	–0,564	0,379	11,1
КК	27	2013	14,15	3,92	–0,074	–0,597	0,917	12,6

Таблица 4 – Результаты статистического расчёта распределения интегрального параметра ИП= $a_т \cdot \ell_т$ на моделях колонн

Вид моделей	Кол-во моделей	Год измерения	M, мм	σ, мм	A	E	$\chi^2_{набл}$	$\chi^2_{кр}$
КБ	23	2011	95,6	37.7	+0,160	–0,170	2,215	12,6
КБ	23	2012	1226	319,6	+0,430	+0,120	2,457	11,1
КБ	23	2013	1802	378,5	–0,140	–0,220	2,584	12,6
КК	27	2011	58,5	27,7	+0,01	–0,298	1,715	9,5
КК	27	2012	600	272	–0,087	–0,300	0,784	9,5
КК	27	2013	918,6	299,4	–0,330	+0,780	0,830	9.5

Таблица 5 – Кинетика изменения относительных значений математического ожидания $a_т$, $\ell_т$ и ИП

Вид моделей	Геометрический, расчетный параметр	Относительные годы	Численные значения	Полученные результаты
КБ	$a_т$	2012 / 2011	0,619 / 0,126	4,9
КБ	$a_т$	2013 / 2012	0,946 / 0,619	1,5
КК	$a_т$	2012 / 2011	0,372 / 0,077	4,8
КК	$a_т$	2013 / 2012	0,619 / 0,372	1,7
КБ	$\ell_т$	2012 / 2011	14,26 / 9,77	1,5
КБ	$\ell_т$	2013 / 2012	14,15 / 12,89	1,1
КК	$\ell_т$	2012 / 2011	12,89 / 5,61	2,3
КК	$\ell_т$	2013 / 2012	14,15 / 12,89	1,1
КБ	ИП	2012 / 2011	1226 / 95,6	12,8
КБ	ИП	2013 / 2012	1802 / 1226	1,5
КК	ИП	2012 / 2011	600 / 58,5	10,3
КК	ИП	2013 / 2012	918, / 600	1,5

Приведенные данные в таблицах 2–5 позволяют сделать следующие выводы.

1. Одинаковый характер увеличения кинетики во времени $a_т$, $\ell_т$ и ИП свидетельствует о незатухающим процессе коррозии арматуры в коррозионных продольных трещинах, что может

объясняться не участием продуктов коррозии арматуры в торможении электрохимического процесса на поверхности, стали, из-за отсутствия геометрической депланации стенок коррозионных продольных трещин.

2. Превышение на 25 % кинетики роста $a_т$ над $\ell_т$ указывает на более высокую глубинную скорость коррозии арматуры, по сравнению с распространением её по длине стержня, что рассматривается как идентификационный характер коррозии на открытой стали.

3. Интегральный показатель (ИП) становится более объективной оценкой суммарного влияния геометрических параметров $a_т$ и $\ell_т$ на техническое состояние железобетонных конструкций, так как позволяет интегрально учитывать все трещины с различной шириной раскрытия, на качественное и количественное определение снижения сцепления арматуры с бетоном и её диаметра.

Литература

1. Шамшина К.В. Влияние коррозионных продольных трещин на деформационные и прочностные свойства железобетонных конструкций: научно-квалификационная работа : диссертация – Пенза : ПГУАС, 2019. – 145 с.
2. Стрижевский И.В. Коррозия и защита арматуры железобетонных трубопроводов / И.В. Стрижевский, Б.Л. Рейзин, Э.И. Йоффе. – М. : Стройиздат, 1972. – 97 с.
3. Артамонов В.С. Коррозия железобетонных труб // Журнал «Строительство трубопроводов». – М. : «Недра», 1967. – № 12. – С. 15–16.
4. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.] // Совместное издание СССР-ЧССР-ФРГ. – М. : Стройиздат,1990. – 320 с.
5. Mangat P. Flexural strength of concrete beans with corroding reinforcement / P. Mangat, M. Elgaf // ACI Structural Jjurnal. – 1999. – Vol 96. – № 1. – P. 149–158.
6. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский Промстройниипроект. – М. : Стройиздат, 1990. – 9 с.
7. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами : монография. – Пенза : ПГУАС, 2013. – Ч. 1. – 332 с.
8. Мигунов В.Н. Экспериментально-теоретическое исследование коррозии и долговечности железобетонных конструкций с трещинами : монография. – Пенза : ПГУАС, 2013. – Ч. 2. – 304 с.
9. СНиП 2.03.11-85* Защита строительных конструкций от коррозии. М. : Госстрой России, 1997. – 48 с.
10. СНиП 52-01-2003.Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – М. : ФГУП ЦПП. 2004. – 24 с.
11. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – М. : ФГУУП ЦПП, 2004. – 53 с.
12. Филатов В.Б. Влияние эксплуатационных повреждений, снижающих сцепление арматуры с бетоном, на прочность изгибаемых железобетонных конструкций : дис … канд. техн. наук. – М. : ННИИЖБ, 1988. – 250 с.
13. Мигунов В.Н. Влияние внутренних факторов на скорость образования продольных трещин железобетонных конструкций с учётом коррозионного поражения арматуры класса А-1 и А-111 // Изв. вузов. Строительство. – 2003. – № 3. – С. 121–123.
14. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – Высшая школа, 1977. – 479 с.

References

1. Shamshina K.V. The influence of corrosive longitudinal cracks on the deformation and strength properties of reinforced concrete structures: scientific and qualification work (dissertation). – Penza : PGUAS, 2019. – 145 c.
2. Strizhevsky I.V. Corrosion and protection of reinforced concrete pipelines / I.V. Strizhevsky, B.L. Reizin, E.I. Joffe. – M. : Stroyizdat, 1972. – 97 c.
3. Artamonov V.S. Corrosion of reinforced concrete pipes // Journal «Pipeline Construction». – 1967. – № 12. – M. : «Nedra». – P. 15–16.
4. Durability of reinforced concrete in aggressive environments / S.N. Alekseev [et al.] // Joint publication of the USSR-Czechoslovakia-Germany. – M. : Stroyizdat, 1990. – 320 c.
5. Mangat P. Flexural strength of concrete beans with corroding reinforcement / P. Mangat, M. Elgaf // ASI Structural Journal. – 1999. – Vol. 96. – № 1. – P. 149–158.

6. Recommendations for ensuring the reliability and durability of reinforced concrete structures in industrial buildings and structures.
7. Migunov V.N. Experimental and theoretical study of corrosion and durability of reinforced concrete structures with cracks : monograph / V.N. Migunov. – Penza: PGASU, 2013. – Part 1. – 332 p.
8. Migunov V.N. Experimental and theoretical study of corrosion and durability of reinforced concrete structures with cracks : monograph. – Penza : PGUAS, 2013. – Part 2. – 304 p.
9. SNiP 2.03.11-85* Protection of building structures from corrosion. – M. : Gosstroy of Russia, 1997. – 48 p.
10. SNiP 52-01-2003.Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. – M. : FSUE TsPP, 2004. – 24 p.
11. SP 52-101-2003 Concrete and reinforced concrete structures without pre stressed reinforcement – M. : FGUP TsPP, 2004. – 53 p.
12. Filatov V.B. The effect of operational damage that reduces the bond between reinforcement and concrete on the strength of bent reinforced concrete structures : dis. … candidate of technical sciences. – M. : NNIZhB, 1988. – 250 p.
13. Migunov V.N. The influence of internal factors on the rate of longitudinal crack formation in reinforced concrete structures, taking into account the corrosion damage to reinforcement of classes A 1 and A III // Izvestiya vuzov. Construction. – 2003. – № 3. – P. 121–123.
14. Gmurman V.E. Probability Theory and Mathematical Statistics. – Higher School, 1977. – 479 p.

УДК 691.32

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕКЛОФИБРОБЕТОНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАСАДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И МОНТАЖА

♦♦♦♦♦

THE USE OF GLASS FIBER CONCRETE FOR THE MANUFACTURE OF FACADE ELEMENTS: PROBLEMS RELATED TO MANUFACTURING AND INSTALLATION TECHNOLOGY

Шестакова Елена Владимировна
старший преподаватель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
elena_shestakova_1979@mail.ru

Абросимова Людмила Павловна
старший преподаватель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
alp6969@mail.ru

Дубиненко Никита Александрович
лаборант кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
nikita-dubinenko@yandex.com

Аннотация. Стеклофибробетон как строительный материал обладает рядом технических преимуществ по сравнению с традиционным бетоном и рядом других традиционных материалов, что позволяет использовать его для изготовления конструкций сложных форм и, в частности, изготовления фасадных элементов с высокой архитектурной выразительностью. При этом, немаловажно уделять достаточно внимания соблюдению технологий изготовления материалов из стеклофибробетона и их монтажа в процессе строительства. В данной статье приведен анализ проблем, связанных с применением стеклофибробетона для изготовления элементов фасадов. Рассмотрены основные способы создания конструкций из стеклофибробетона, а также технологии монтажа готовых фасадных элементов. По результатам анализа сделаны выводы о перспективах дальнейшего распространения фасадных элементов из стеклофибробетона в строительной отрасли.

Ключевые слова: стеклофибробетон, стеклофибра, стекловолокно, фасадные элементы, фасадные панели, фасадная лепнина.

Shestakova Elena Vladimirovna
Senior Lecturer at the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
elena_shestakova_1979@mail.ru

Abrosimova Lyudmila Pavlovna
Senior Lecturer at the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
alp6969@mail.ru

Dubinenko Nikita Aleksandrovich
Laboratory Assistant at the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
nikita-dubinenko@yandex.com

Annotation. Glass fiber concrete as a building material has a number of technical advantages over concrete and reinforced concrete, which makes it possible to use it to improve the appearance of residential building facades. At the same time, it is important to pay sufficient attention to compliance with the technologies for manufacturing glass fiber concrete materials and their installation during the construction process. This article provides an analysis of the problems associated with the use of glass fiber concrete for the manufacture of facade elements. The main methods for creating structures from glass fiber concrete, as well as the technologies for installing finished facade elements, are considered. Based on the analysis, conclusions have been drawn regarding the prospects for the further spread of facade elements made of glass fiber concrete in the construction industry.

Keywords: glass fiber concrete, glass fiber, fiberglass, facade elements, facade panels, facade stucco molding.

Стеклофибробатон (СФБ) – современный композитный строительный материал, представляющий собой специализированный вид фибробетона, армированный цирконийсодержащим щелочестойким стекловолокном. Опыт применения стеклофибробетона в отечественной строительной отрасли основывается на ряде разработок времен СССР периода 1940-х – 1950-х гг. и последующих исследованиях стеклоармированных композиций.

В настоящий момент существуют научные публикации, освещающие некоторые аспекты использования стеклофибробетона: его технические характеристики, физико-механические свойства и пр. [1–3]. Рассмотрены вопросы изготовления фасадных панелей из СФБ, а также его применение в сложных специфичных конструкциях уникальных зданий и сооружений [4–7]. В сфере отечественных нормативных документов, регулирующих процессы производства стеклофибробетона можно выделить следующие: Ведомственные строительные нормы «Проек-

тирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций» ВСН 56-97, введенные в 1997 г., и более современный ГОСТ Р 58757-2019 «Изделия из стеклофибробетона для устройства декоративных и облицовочных элементов фасадов зданий» [8, 9].

При этом, актуальными направлениями для исследования являются: проблема применения стеклофибробетона для изготовления фасадных элементов; проблема монтажа изделий из СФБ; проблема подбора состава для достижения заданных характеристик подвижности смеси. Все эти темы в незначительной степени представлены в профессиональной литературе, используемой на производстве, что в особенности можно наблюдать в сравнении с классическими бетонами, вопросы изготовления и применения которых достаточно широко освещены.

В рамках данной статьи представлен анализ проблематики технологических процессов изготовления и монтажа фасадных конструкций из СФБ. Также рассмотрены перспективы применения стеклофибробетона для целей строительной отрасли Краснодарского края.

В настоящий момент установлены следующие положительные характеристики стеклофибробетона в сравнении с прочими строительными материалами: высокая прочность на сжатие; повышенные показатели трещиностойкости; водонепроницаемость; эксплуатационная стойкость; повышенная декоративность [3]. Благодаря армированию стеклофиброй, в сравнении с бетонами аналогичных марок, СФБ имеет предел прочности на растяжение при изгибе в 4–5 раз выше, на осевое растяжение – в 3–4 раза выше, ударную вязкость – в 15–20 раз выше. Считается, что стеклофибробетон целесообразно применять при следующих условиях: техническое преимущество СФБ над бетоном или железобетоном; наличие требований по морозостойкости и атмосферостойкости; снижение риска откалывания углов и граней; необходимость применения пневмонабрызга и т.д. [3].

Особенности стеклофибробетона позволяют использовать его в фасадных решениях. Основная цель этого – повышение архитектурной выразительности строящихся зданий, что достигается за счет большей легкости СФБ в сравнении с железобетоном, его устойчивости к воздействию коррозии и агрессивных сред, большей экологичности [10]. Высокая степень детализации изделий, а также многообразие фактур и эффектов позволяют создавать из стеклофибробетона материалы со сложным декором и разнообразной фактурой (допустима имитация натурального камня, дерева или металла).

Несмотря на явные преимущества (в частности, при облицовке фасадов) данного строительного материала, крайне важно не забывать о возможных отрицательных последствиях его применения, среди которых: нарушение плоскости фасада; возникновение трещин и деформаций в изделиях из стеклофибробетона; смещение панелей; расшатывание деталей; появление щелей; нарушение изначальной геометрии элементов [11]. Данные последствия напрямую связаны с несоблюдением особенных технологических процессов изготовления и монтажа облицовочных элементов из СФБ.

Ключевое значение в технологическом процессе производства изделий из стеклофибробетона принадлежит подбору рецептуры состава. В настоящий момент положения ГОСТ Р 58757-2019 «Изделия из стеклофибробетона для устройства декоративных и облицовочных элементов фасадов зданий» регулируют данный процесс. При этом большая роль отводится работе технологов на производстве, которым необходимо: контролировать соответствие изделий из СФБ действующим нормам, а также рабочим чертежам и технологической документации производителя; вести контроль допустимых отклонений размеров СФБ изделий от проектных параметров; следить за соблюдением проектного положения элементов узлов крепления и т.д. [9].

Технические требования к массе СФБ характеризуются рядом показателей, в том числе: плотность (не менее 1600 кг/м3 и не более 2150 кг/м3); подвижность; сохраняемость первоначальной подвижности; водоудерживающая способность; водоудерживающая способность (не менее 95 %) и т.п. [9]. Грамотный учет всех этих характеристик для достижения заданных проектных значений также входит в зону ответственности технологов на производстве.

Качество стеклофибробетона зависит и от свойств применяемых сырьевых компонентов. В частности, учитываются следующие параметры: марка цемента (для производства должен применяться цемент высоких марок); водоцементное соотношение; качество и однородность песка (рекомендовано использовать мытый кварцевый песок); щелочестойкость стекловолокна (в условиях щелочной среды бетона во избежание растворения фибры, необходимо подбирать стекловолокно с содержанием диоксида циркония ZrO_2 не менее 16,2 %); процентное содержание фибры (не менее 3,5 % по весу состава); длина фиброволокна (от 8 до 28 мм); применение пластификаторов и добавок [9, 10].

Согласно положениям ГОСТ Р 58757-2019 «Изделия из стеклофибробетона для устройства декоративных и облицовочных элементов фасадов зданий», по способу изготовления изделия из стеклофибробетона подразделяются на две группы:

1-я группа – изделия, изготавливаемые методом напыления массы стоклофибробетона на матрицу-форму [9]. В данном случае смешение массы с фиброй осуществляется перед напылением с применением распылительного устройства, также осуществляющего дозирование и резку стекловолокна. Напыление осуществляется путем пневмонабрызга для достижения максимального предела прочности на изгиб: с помощью специального пистолета-напылителя под давлением подается раствор, в результате чего волокна ложатся хаотично, во всех плоскостях создается объемный армирующий каркас [10].

2-я группа – изделия, изготавливаемые методом нанесения (заливки) заранее подготовленной массы на матрицу-форму с последующим виброформированием [12]. Для достижения заданных характеристик подбирается размер и дозировка стекловолокна [9]. Обычно количество фибры ограниченно и составляет в районе 2–3 %, в соответствии с установленной технологией.

Наиболее рациональная технология производства изделий из СФБ – пневмонабрызг, т.к. именно он обеспечивает наибольшую прочность материала [12]. В сравнении с пневмонабрызгом, виброформирование приводит к неравномерному распределению фибры, оседанию волокон на дне, что недопустимо в условиях производства фасадных панелей.

Процесс соблюдения дальнейших условий твердения и хранения фасадных изделий из стеклофибробетона должен контролироваться технологами и проходить в соответствии с установленными требованиями нормативов и технологической документации производителя. В частности, в соответствии с положениями ГОСТ Р 58757-2019 «Изделия из стеклофибробетона для устройства декоративных и облицовочных элементов фасадов зданий» необходимо: первые 12 ч после изготовления – хранение в специальном помещении с контролем температуры t = (30 + 3) ℃ и влажности (95 + 5) %; последующее время до достижения 28 сут – хранение в упаковке из влагопаронепроницаемого материала с контролем температуры t = (20 + 2) ℃ и влажности (70 + 5) % [9].

Среди основных технологий монтажа фасадных изделий из СФБ можно выделить: крепление стеновых панелей методом навесных конструкций (при этом используется каркас из нержавеющих металлических направляющих, к которым фиксируются панели скрытым или открытым способом); крепление фасадной лепнины на металлические подсистемы или, в случае небольших деталей, на металлические заклепки, шпильки и болты [13]. Перед монтажом важно правильно подготовить основание, ведь именно от качества основания впоследствии зависит долговечность изделия. При подготовке основания часто допускаются следующие ошибки: недостаточная очистка поверхности; неровность основания; слабая несущая способность основания; отсутствие грунтования; игнорирование температурных деформаций [11]. Все это может привести к возникновению неравномерных нагрузок и перекосов, деформации и разрушению узлов крепления, нарушению швов, появлению трещин в стеклофибробетоне.

В условиях Краснодарского края в целом, и города Краснодара в частности, также применяется стеклофибробетон. Над изготовлением фасадных элементов из СФБ работает компания «DecoGuide», реализующая комплексные решения для архитектурного оформления фасадов на базе производственного комплекса полного цикла [14]. В том числе для украшения фасадов зданий применяются следующие элементы: балюстрады, пилястры, колонны, карнизы, кронштейны, навершия, наличники, подоконники, рустовые камни, замковые камни, облицовочные плиты, розетки, филенки, кессоны.

Таким образом, можно сделать вывод, что стеклофибробетон – современный и перспективный строительный материал с улучшенными свойствами и возможностями. При этом, в сфере производства фасадных элементов из СФБ наблюдается значительный недостаток профессиональной литературы, раскрывающей тонкости технологических процессов, описывающей возможные трудности. Следствием этого в ряде случаев становятся серьезные ошибки при изготовлении и монтаже изделий из стеклофибробетона, влекущие за собой неисправимые последствия, вплоть до нарушения геометрии готовых материалов или их деформации.

Стоит заметить, что большая роль в вопросе качества изделий из СФБ отводится технологам, именно от их работы зависит подбор рецептуры, контроль за ее соблюдением, создание необходимых условий для твердения. Предприятие-изготовитель должно разрабатывать технологические карты на производство фасадных изделий из стеклофибробетона, обеспечивать полный контроль за готовой продукцией.

В целом, при соблюдении технологий в процессе производства и монтажа фасадных элементов, стоклофибробетон будет отвечать заданным эксплуатационным требованиям. Его дальнейшее внедрение в отечественную строительную отрасль с целью создания фасадных элементов позволит перейти на качественно новый этап в вопросе художественного оформления зданий.

Литература

1. Кондратьева Н.В. Исследование технических характеристик стеклофибробетона / Н.В. Кондратьева, М.А. Головатюк // Градостроительство и архитектура. – 2023. – Т. 13. – № 1(50). – С. 82–91.
2. Дураченко А.В. Современное применение стеклофибробетона // Молодежь и научно-технический прогресс: Сборник докладов XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : в 2 т. г. Губкин, 08–09 апреля 2021 года. – Губкин : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – Т. 1. – С. 324–327.
3. Габидуллин М.Г. Исследование влияния характеристик стеклофибры на физико- механические свойства стеклофибробетона / М.Г. Габидуллин, Р.Т. Багманов, А.Я. Шангараев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 1(13). – С. 268–273.
4. Шнурникова Е.П. Применение инновационных материалов на примере реконструкции «Театрального дома» в городе Москве / Е.П. Шнурникова, Е.А. Трусова // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2024. – № 3(36). – С. 6–10.
5. Хижина Д.А. Строительные смеси для изготовления фасадных панелей / Д.А. Хижина, Л.И. Куприяшкина // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы двадцать третьей международной научно-технической конференции, Саранск, 05–07 марта 2025 года. – Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2025. – С. 99–104.
6. Кирсанова В.Г. Использование стеклофибробетона в конструкциях сложной формы при строительстве уникальных зданий и сооружений // Молодой ученый. – 2025. – № 5(556). – С. 31–36.
7. Черных В.Ф. Современные материалы и системы в строительстве / В.Ф. Черных, Е.А. Строителева, Е.В. Шестакова. – Краснодар : Кубанский государственный технологический университет, 2018. – 219 с.
8. Ведомственные строительные нормы ВСН 56-97 «Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций». Дата введения: 01.07.1997. – URL : https://base.garant.ru/71673480 (дата обращения 10.09.2026).
9. ГОСТ Р 58757-2019 «Изделия из стеклофибробетона для устройства декоративных и облицовочных элементов фасадов зданий». Дата введения: 09.01.2020. – URL : https://base.garant.ru/71673480 (дата обращения 10.09.2026).
10. Стеклофибробетон для декора фасада: преимущества и недостатки, факторы, влияющие на качество материала. – URL : https://ppart.ru/stati/steklofibrobeton-dlya-dekora-fasada-preimushestva-i-nedostatki-faktory-vliyayushie-na-kachestvo-materiala/?ysclid=mu8ulr5kl6112091364 (дата обращения 05.09.2026).
11. Какие ошибки возникают при подготовке основания. – URL : https://labdecor.com/help/stati/kakie-oshibki-voznikayut-pri-podgotovke-osnovaniya (дата обращения 05.09.2026).
12. Как определить качество стеклофибробетона: нормы, состав и характеристики. – URL : https://elitfasad.ru/stati/kak-proverit-kachestvo-steklofibrobetona/?ysclid=mu8upxjjs6891427457 (дата обращения 07.09.2026).
13. Монтаж стеклофибробетона. Факторы, влияющие на качество монтажных работ. – URL : https://ppart.ru/stati/montazh-steklofibrobetona-faktory-vliyayushie-na-kachestvo-montazhnyh-rabot/?ysclid= mu8uqofzpj126276716 (дата обращения 07.09.2026).
14. Фасадный и архитектурный декор из стеклофибробетона. Decoguide. – URL : https://decoguide.ru/fasad (дата обращения 11.09.2026).

References

1. Kondratyeva N.V. Study of the technical characteristics of glass fiber concrete / N.V. Kondratyeva, M.A. Golovatyuk // Urban Construction and Architecture. – 2023. – Vol. 13. – № 1(50). – P. 82–91.
2. Durachenko A.V. Modern applications of glass fiber concrete // Youth and Scientific and Technological Progress: Collection of Reports of the XIV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists : in 2 vol. Gubkin, April 8–9, 2021. – Gubkin: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. – Vol.1. – P. 324–327.
3. Gabidullin M.G. Study of the influence of glass fiber characteristics on the physical and mechanical properties of glass fiber concrete / M.G. Gabidullin, R.T. Bagmanov, A.Ya. Shangaraev // Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Engineering. – 2010. – № 1(13). – P. 268–273.

4. Shnurnikova E.P. The use of innovative materials: a case study of the reconstruction of the «Theatre House» in Moscow / E.P. Shnurnikova, E.A. Trusova // Urban Planning. Infrastructure. Communications. – 2024. – № 3(36). – P. 6–10.
5. Khizhina D.A. Construction mixtures for the manufacture of facade panels / D.A. Khizhina, L.I. Kupriyashkina // Current issues in architecture and construction: materials of the twenty third international scientific and technical conference, Saransk, March 5–7, 2025. – Saransk : National Research Mordovia State University named after N.P. Ogarev, 2025. – P. 99–104.
6. Kirsanova V.G. The use of glass fiber concrete in structures of complex shape in the construction of unique buildings and structures // Young Scientist. – 2025. – № 5(556). – P. 31–36.
7. Chernykh V.F. Modern Materials and Systems in Construction / V.F. Chernykh, E.A. Stroitelova, E.V. Shestakova. – Krasnodar : Kuban State Technological University, 2018. – 219 p.
8. Departmental construction standards VSN 56-97 «Design and basic provisions of fiber concrete structures production technologies». Date of introduction: 01.07.1997. – URL : https://base.garant.ru/71673480 (date of application 10.09.2026).
9. GOST R 58757-2019 «Products made of glass fiber concrete for the construction of decorative and cladding elements of building facades». Date of introduction: 09.01.2020. URL : https://base.garant.ru /71673480 (date of application 10.09.2026).
10. Glass fiber concrete for facade decoration: advantages and disadvantages, factors affecting the quality of the material. – URL : https://ppart.ru/stati/steklofibrobeton-dlya-dekora-fasada-preimushestva-i-nedostatki-faktory-vliyayushie-na-kachestvo-materiala/?ysclid=mu8ulr5kl61120 91364 (date of application 05.09.2026).
11. What errors occur when preparing the base. – URL : https://labdecor.com/help/stati/kakie-oshibki-voznikayut-pri-podgotovke-osnovaniya (date of application 05.09.2026).
12. How to determine the quality of glass fiber concrete: standards, composition and characteristics. – URL : https://elitfasad.ru/stati/kak-proverit-kachestvo-steklofibrobetona/?ysclid=mu8upxjjs6891427457 (date of application 07.09.2026).
13. Installation of glass fiber concrete. Factors affecting the quality of installation work. – URL : https://ppart.ru/stati/montazh-steklofibrobetona-faktory-vliyayushie-na-kachestvo-montazhnyh-rabot/?ysclid=mu8uqofzpj126276716 (date of application 07.09.2026).
14. Facade and architectural decor made of glassfibrocement. Decoguide. – URL : https://decoguide.ru/fasad (date of application 11.09.2026).

УДК 69.059.73

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФУНДАМЕНТОВ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ИСТОРИЧЕСКОГО ПОСЕЛЕНИЯ ГОРОДА КРАСНОДАР

♦♦♦♦♦

DESIGN FEATURES OF THE FOUNDATIONS OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS IN THE HISTORICAL SETTLEMENT OF KRASNODAR

Шнурникова Елена Павловна
старший преподаватель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
shnurnikova@mail.ru

Турчак Анна Евгеньевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
A19052002@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема технического состояния и реконструкции фундаментов объектов культурного наследия исторического поселения города Краснодара, преимущественно сформировавшихся в конце XIX – начале XX веков. Длительный срок эксплуатации исторических зданий, воздействие природных и техногенных факторов, изменение эксплуатационных нагрузок и состояния грунтов основания обусловливают необходимость систематического обследования и разработки индивидуальных мероприятий по сохранению и усилению конструкций. Материалы и методы: Исследование выполнено на основе анализа учетной и технической документации объектов культурного наследия, материалов обследований и сведений о конструктивных особенностях зданий. Рассмотрено более 50 объектов, расположенных в историческом поселении города Краснодара. Проведена систематизация конструктивных решений фундаментов, характера выявленных дефектов и показателей физического износа. Дополнительно проанализированы современные методы усиления фундаментов, включая инъекционные технологии и применение микросвай. Результаты: Установлено, что в исследованной выборке около 97 % объектов имеют ленточные кирпичные фундаменты. Для наиболее распространенных конструкций характерны осадочные деформации, трещины, локальное разрушение кладки, выбоины и отсутствие либо нарушение гидроизоляции. Физический износ рассмотренных фундаментов составляет преимущественно 40–70 %. Наиболее выраженные повреждения выявлены на объектах, где одновременно наблюдаются неблагоприятные условия основания, длительная эксплуатация и недостаточное водоотведение. Рассмотрены два основных направления реконструкции: усиление существующих фундаментов с использованием инъекционных и свайных технологий и устройство нового плитного фундамента при соответствующем технико-экономическом и конструктивном обосновании. Выводы: Выбор способа усиления или реконструкции фундаментов объектов культурного наследия должен осуществляться индивидуально на основании результатов инженерно-геологических исследований, обследования конструкций, оценки характера деформаций и требований к сохранению предмета охраны. Наиболее перспективными являются технологии, позволяющие минимизировать вмешательство

Shnurnikova Elena Pavlovna
Senior Lecturer of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
shnurnikova@mail.ru

Turchak Anna Evgenievna
Student,
Kuban State Technological University
A19052002@gmail.com

Annotation. Introduction: The paper considers the technical condition and reconstruction of foundations of cultural heritage sites located within the historical settlement of Krasnodar, most of which were constructed in the late nineteenth and early twentieth centuries. The long service life of historical buildings, natural and anthropogenic impacts, changes in operational loads, and changes in soil conditions necessitate systematic inspection and the development of individual measures for the conservation and strengthening of foundations. Materials and methods: The study is based on an analysis of inventory and technical documentation of cultural heritage sites, inspection materials, and information on the structural characteristics of historical buildings. More than 50 buildings located within the historical settlement of Krasnodar were considered. The foundation systems, characteristic defects, and physical deterioration were systematized. Modern foundation strengthening techniques, including injection technologies and micropiles, were also analyzed. Results: The study established that approximately 97% of the buildings in the examined sample have strip brick foundations. Settlement deformations, cracks, local masonry deterioration, cavities, and the absence or failure of waterproofing are the most common defects. The physical deterioration of the examined foundations generally ranges from 40 to 70 %. The most significant damage occurs where unfavorable soil conditions, long-term operation, and inadequate drainage act simultaneously. Two principal approaches to reconstruction are considered: strengthening existing foundations using injection and pile technologies and, where technically and economically justified, converting the existing foundation system into a slab foundation. Conclusions: The selection of a strengthening or reconstruction method for the foundations of cultural heritage sites should be based on engineering-geological investigations, structural inspection, assessment of the deformation mechanism, and preservation requirements. Technologies that minimize intervention in the historic fabric of a building and provide controlled load

в историческую материю здания и обеспечить контролируемую передачу нагрузки на основание.

Ключевые слова: объект культурного наследия, историческое поселение, реконструкция, реставрация, фундамент, ленточный фундамент, кирпичная кладка, основание, осадка, усиление фундамента, микросваи, техническое состояние.

transfer to the foundation soil are considered the most promising.

Keywords: cultural heritage site, historical settlement, reconstruction, restoration, foundation, strip foundation, brick masonry, soil base, settlement, foundation strengthening, micropiles, technical condition.

Введение

Сохранение исторической архитектурной среды является одной из важнейших задач современной архитектурно-реставрационной деятельности. Особую сложность представляет сохранение конструктивных элементов зданий, которые в течение длительного периода эксплуатации подвергались воздействию атмосферных и грунтовых вод, температурных колебаний, изменениям эксплуатационных нагрузок и неоднородным деформациям основания.

Фундаменты объектов культурного наследия являются конструктивными элементами, обеспечивающими передачу нагрузок от здания на грунтовое основание. В процессе длительной эксплуатации изменение физико-механических характеристик грунтов, нарушение водоотведения, воздействие грунтовых вод, увеличение или перераспределение нагрузок способны приводить к развитию осадок и деформаций. Современные требования к обследованию зданий предусматривают комплексную оценку технического состояния конструкций, оснований и фундаментов, а также необходимость мониторинга при наличии развивающихся деформаций [1].

В соответствии с законодательством Российской Федерации работы по сохранению объектов культурного наследия должны учитывать историческую и архитектурную ценность здания и выполняться на основании соответствующей научно-проектной документации [2, 3]. Поэтому реконструкция или усиление фундамента исторического здания отличается от аналогичных работ на обычных объектах капитального строительства: техническое решение должно одновременно обеспечивать конструктивную безопасность и сохранение исторически ценных элементов.

Современные исследования исторических каменных зданий показывают, что диагностика повреждений должна учитывать взаимосвязь между состоянием кладки, фундаментами, грунтовым основанием и эксплуатационными воздействиями. Для объектов культурного наследия все большее значение приобретают инструментальный мониторинг, методы неразрушающего контроля и цифровые методы обработки данных [4]. Экспериментальные исследования также подтверждают, что характер повреждений каменной кладки при осадках зависит от распределения массы здания, расположения проемов и конструктивной схемы перекрытий [5].

Историческая застройка Краснодара представляет особый интерес для исследования. В границах исторического поселения расположено значительное количество зданий, возведенных в конце XIX – начале XX веков. Требования к сохранению исторической градостроительной среды определены региональными нормативными документами, устанавливающими предмет охраны, границы территории исторического поселения и соответствующие градостроительные требования [6].

Целью исследования является анализ конструктивных особенностей фундаментов объектов культурного наследия исторического поселения города Краснодара, выявление наиболее распространенных дефектов и определение перспективных методов их усиления и реконструкции.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- исследовать объекты культурного наследия, расположенные в историческом поселении города Краснодара;
- определить конструктивные особенности наиболее распространенных типов фундаментов;
- систематизировать характерные дефекты фундаментов и основания;
- определить основные факторы, влияющие на развитие деформаций;
- проанализировать современные технологии усиления и реконструкции фундаментов исторических зданий;
- сформулировать рекомендации по выбору конструктивных решений с учетом требований сохранения объектов культурного наследия.

Материалы и методы

Исследование конструктивных особенностей фундаментов объектов культурного наследия исторического поселения города Краснодара основано на комплексном анализе технической и учетной документации, материалов обследований и сведений о конструктивных решениях исторических зданий.

Исходную базу исследования составили учетные карточки объектов культурного наследия, технические паспорта, материалы историко-архитектурных исследований и сведения о

техническом состоянии отдельных конструктивных элементов. При интерпретации результатов учитывались требования нормативных документов, регулирующих обследование зданий, проектирование оснований и фундаментов, производство работ и сохранение объектов культурного наследия [1–3, 7].

Методика исследования включала следующие основные этапы:

1) формирование выборки объектов культурного наследия исторического поселения;
2) анализ историко-архитектурной и технической документации;
3) систематизацию типов фундаментов;
4) классификацию выявленных дефектов;
5) анализ показателей физического износа;
6) сопоставление технического состояния фундаментов с конструктивными особенностями зданий;
7) анализ инженерно-геологических факторов;
8) сравнительную оценку современных методов усиления фундаментов.

При обследовании особое внимание уделялось следующим характеристикам:

- типу фундамента
- материалу и конструкции фундамента;
- наличию и характеру трещин;
- признакам осадки;
- локальному разрушению кладки;
- состоянию гидроизоляции;
- наличию деформаций цокольной части;
- степени физического износа;
- техническому состоянию основания;
- условиям водоотведения.

Для анализа современных методов усиления использовались результаты исследований исторической каменной кладки, мониторинга технического состояния, оценки осадок и применения современных геотехнических технологий [4, 5, 8–11].

В соответствии с действующими нормативными требованиями обследование должно обеспечивать получение информации, необходимой для оценки технического состояния здания и принятия решений о возможности его дальнейшей эксплуатации, ремонте, усилении или реконструкции [1]. При наличии признаков развивающихся деформаций целесообразна организация мониторинга, позволяющего установить динамику изменения параметров технического состояния.

В рамках настоящего исследования рассмотрено более 50 объектов культурного наследия. Полученные показатели относятся непосредственно к исследованной выборке и не распространяются автоматически на всю совокупность исторической застройки Краснодара.

По результатам анализа установлено, что примерно в 97 % исследованных зданий применены ленточные кирпичные фундаменты. В остальных случаях выявлены ленточные бетонные фундаменты. Физический износ наиболее распространенных конструкций находится преимущественно в диапазоне 40–70 %.

Основные выявленные дефекты представлены на рисунке 1.

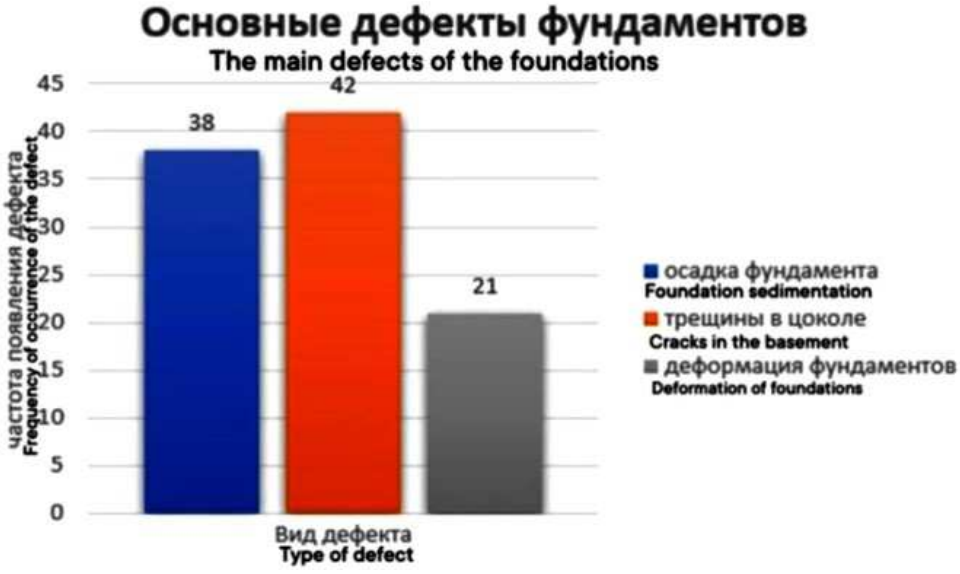


Рисунок 1 – Основные дефекты фундаментов объектов культурного наследия города Краснодара

Результаты исследования

В результате анализа были выделены наиболее характерные объекты различного функционального назначения, фундаменты которых характеризуются значительным физическим износом и наличием выраженных дефектов.

К числу рассмотренных объектов относятся:

1. «Корпус войскового вино-водочного завода», 1902 г., ул. Митрофана Седина, 6, лит. И.
2. «Школа церковно-приходская», ул. Фрунзе, 67.
3. «Дом благотворительного общества», ул. Красная, 57.
4. «Комплекс зданий войсковой богадельни и городской больницы», ул. Красная, 103 / ул. Длинная, 123.

Следует отметить, что в исходной документации дата объекта «Школа церковно-приходская, 1969 г.» требует дополнительной проверки. В настоящем варианте статьи дата строительства не используется как основание для классификации исторической застройки до подтверждения по первичному источнику.

Корпус войскового вино-водочного завода

Показательным представителем промышленной группы является «Корпус войскового вино-водочного завода», расположенный по адресу: ул. Митрофана Седина, 6, лит. И.

Здание имеет сложную прямоугольную конфигурацию, три этажа, подвал и антресоль. Стены выполнены из кирпича, кровля металлическая.

По данным обследования фундамент здания выполнен из бетона по ленточной схеме. В цокольной части выявлены трещины. Физический износ конструкции оценивается в 55 %. Техническое состояние определяется как неудовлетворительное и требует проведения ремонтно-восстановительных мероприятий.



Рисунок 2 – «Корпус войскового вино-водочного завода», ул. Митрофана Седина, 6, лит. И

При разработке проектных решений для данного объекта необходимо учитывать не только состояние существующего фундамента, но и изменение функционального назначения здания, поскольку перераспределение эксплуатационных нагрузок может привести к изменению напряженно-деформированного состояния основания.

Школа церковно-приходская

В качестве примера гражданского общественного здания рассмотрена школа, расположенная по адресу: ул. Фрунзе, 67.

Одноэтажное кирпичное здание имеет Г-образную конфигурацию плана и коридорную планировочную схему. Здание расположено в исторической части города.

При анализе отдельных частей здания установлено различие в техническом состоянии фундаментов. В лит. А1 фундамент бетонный ленточный. Его техническое состояние оценивается как хорошее, физический износ составляет около 20 %. Существенных деформаций не выявлено.

В лит. В фундамент выполнен из кирпича по ленточной схеме. Выявлены осадочные трещины. Физический износ составляет около 60 %, что требует проведения дополнительных мероприятий по обследованию и, при подтверждении причин деформации, усилению конструкции.

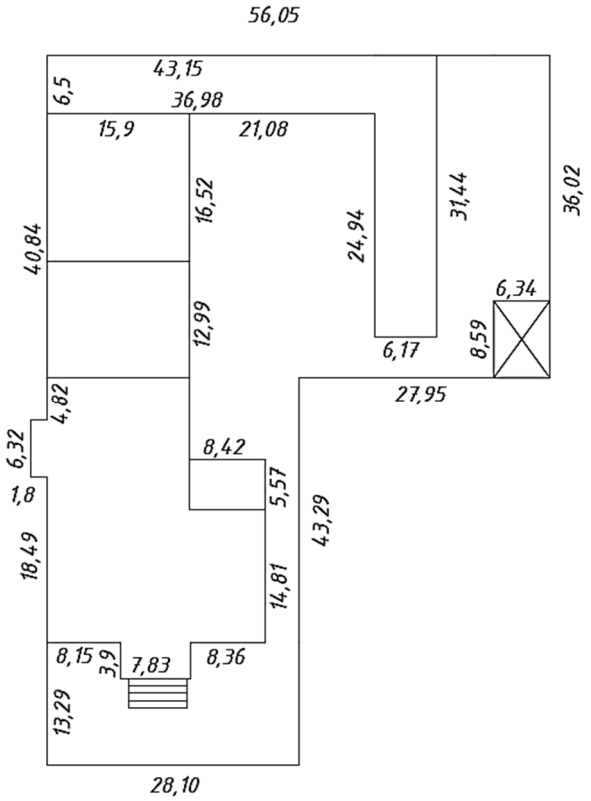


Рисунок 3 – план участка ул. Фрунзе, 67



Рисунок 4 – «Школа церковно-приходская 1969 г.» – ул. Фрунзе, 67

Различие технического состояния фундаментов отдельных частей одного здания показывает, что при реконструкции исторических объектов нельзя рассматривать фундамент только как единый конструктивный элемент. Необходимо учитывать различия в конструкции, состоянии грунтов, условиях водоотведения и фактическом характере передачи нагрузки.

Дом благотворительного общества

Следующим объектом исследования является «Дом благотворительного общества» по адресу: ул. Красная, 57.

Здание трехэтажное, кирпичное, с оштукатуренными декоративными элементами, расположено на красной линии улицы Красной в историческом центре города.

В плане здание имеет симметричную П-образную композицию. Основная планировочная схема коридорная.

Фундамент здания выполнен из кирпича по ленточной схеме. В ходе обследования выявлены трещины и признаки осадки. Физический износ оценивается в 55 %. Состояние конструкции требует проведения комплекса ремонтно-восстановительных мероприятий.



Рисунок 5 – «Дом благотворительного общества» – ул. Красная, 57

В данном случае характер повреждений может быть связан как с длительным периодом эксплуатации кирпичной кладки, так и с изменением условий работы основания. Поэтому перед проектированием усиления необходимо установить механизм образования трещин и определить, продолжается ли процесс деформации.

Комплекс зданий войсковой богадельни и городской больницы

Наиболее масштабным объектом исследования является комплекс зданий войсковой богадельни и городской больницы по адресу: ул. Красная, 103 / ул. Длинная, 123. Историческая информация об объекте также представлена в материалах туристско-информационного ресурса муниципального образования город Краснодар [12].

Комплекс включает несколько зданий и сооружений, формирующих единую историческую застройку участка.



Рисунок 6 – «Комплекс зданий войсковой богадельни и городской больницы» – ул.Красная/Длинная 103/123

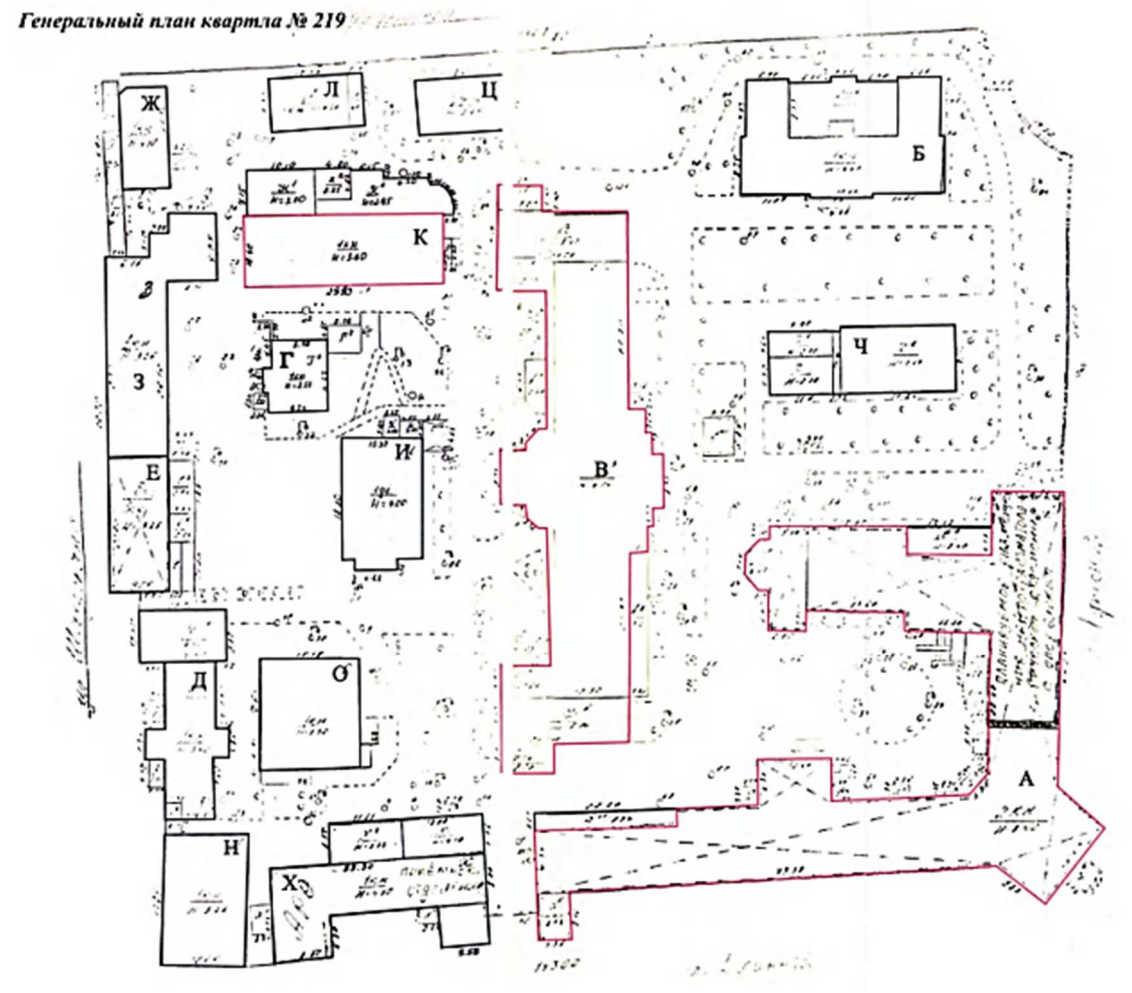


Рисунок 7 – план участка ул.Красная/Длинная 103/123

Для отдельных литеров выявлены следующие характеристики.

Лит. А, А1, А2, п/А, п/А1 имеют кирпичные ленточные фундаменты. Основным выявленным дефектом является осадка. Физический износ отдельных участков составляет около 40–65 %. Техническое состояние оценивается как неудовлетворительное.

Лит. а11, а14 также имеют кирпичные ленточные фундаменты. Выявлены признаки осадки. Физический износ составляет около 50–60 %.

Лит. В, В1, В2, В3, В4, В5, В6, В7 имеют кирпичные ленточные фундаменты. Выявлены осадка, трещины и общая деформация отдельных участков. Физический износ достигает 60–70 %.

Лит. К, К1, К2 имеют кирпичные ленточные фундаменты. Выявлены осадка, трещины, выбоины и деформация отдельных участков конструкции. Физический износ составляет около 50–70 %.

Полученные данные свидетельствуют о неоднородности технического состояния конструкций даже в пределах одного исторического комплекса. Поэтому применение единого решения для усиления всех фундаментов комплекса является недостаточно обоснованным. Конструктивные решения должны разрабатываться по отдельным участкам с учетом фактического состояния каждого фрагмента.

Анализ результатов

По результатам анализа более 50 объектов культурного наследия установлено, что основным конструктивным типом фундаментов исторической застройки исследованной выборки являются ленточные кирпичные фундаменты. Их доля составляет около 97 %.

Выявленный диапазон физического износа кирпичных фундаментов составляет преимущественно 40–70 %. При этом величина физического износа сама по себе не должна использоваться как единственный критерий определения категории технического состояния. Окончательное решение о возможности дальнейшей эксплуатации, усилении или замене конструкции должно основываться на результатах обследования и оценке фактической несущей способности, устойчивости и характера развития деформаций [1].



Рисунок 8 – Пример реконструкции ленточных кирпичных фундаментов в историческом поселении г. Краснодар

Основными причинами ухудшения состояния фундаментов являются:

- длительный срок эксплуатации;
- разрушение или отсутствие гидроизоляции;
- воздействие грунтовых и поверхностных вод;
- неоднородность основания;
- неравномерные осадки;
- изменение эксплуатационных нагрузок;
- нарушение системы водоотведения;
- локальное разрушение кладки;
- проведение позднейших перестроек и перепланировок;
- изменение инженерных коммуникаций.

Особое значение имеет состояние грунтов основания. При реконструкции необходимо учитывать инженерно-геологические условия конкретного участка, поскольку изменение влажности, плотности и деформационных характеристик грунта может существенно изменить условия работы существующего фундамента.

По имеющимся материалам для отдельных участков исторического поселения характерно наличие техногенных грунтов и неоднородных грунтовых толщ. Верхние техногенные слои могут включать насыпные грунты различного состава. Ниже располагаются эолово-делювиальные и аллювиальные отложения различного возраста и состава.

Наличие неоднородных насыпных грунтов требует обязательного уточнения их физико-механических характеристик на стадии инженерно-геологических изысканий. Нельзя заранее считать весь техногенный слой непригодным для основания: возможность его использования должна определяться по результатам конкретных изысканий.

Современные методы реконструкции и усиления фундаментов

Выбор способа усиления исторического фундамента является многофакторной задачей. При его решении необходимо учитывать:

- фактическое техническое состояние здания;
- характер и интенсивность деформаций;
- состояние существующей кладки;
- инженерно-геологические условия;
- уровень грунтовых вод;
- величину и характер действующих нагрузок;
- предполагаемое изменение функционального назначения;
- возможность доступа к фундаменту;
- наличие инженерных коммуникаций;
- требования к сохранению предмета охраны;
- экономическую целесообразность работ.

Современные исследования исторических зданий показывают, что предпочтение следует отдавать решениям, обеспечивающим достаточную конструктивную эффективность при минимально необходимом вмешательстве в историческую материю [4, 8, 9].

Усиление инъекционными технологиями

Одним из перспективных направлений является применение инъекционных технологий для укрепления грунтов и отдельных участков фундаментных конструкций.

Сущность технологии заключается в нагнетании специального раствора в грунтовое основание или поврежденную зону с целью заполнения пустот, повышения плотности и улучшения физико-механических характеристик массива.

Преимуществами метода являются:

- возможность работы в условиях ограниченного пространства;
- отсутствие значительных динамических воздействий;
- возможность локального воздействия;
- возможность повышения однородности и несущей способности основания;
- снижение объема земляных работ.

Однако применение инъекционных технологий требует тщательного контроля давления нагнетания. При работе рядом с исторической кирпичной кладкой чрезмерное давление может привести к дополнительному раскрытию трещин или повреждению конструкций. Поэтому технологические параметры должны определяться проектной организацией на основании результатов обследования и испытаний.

При сложных геотехнических условиях перспективным является сочетание инструментального мониторинга и численного моделирования. Современные исследования показывают возможность применения трехмерного моделирования для оценки взаимодействия исторического здания и грунтового основания [10].

Усиление с помощью микросвай

Другим перспективным способом является применение микросвай.

Микросваи позволяют передавать часть нагрузки от существующей конструкции на более глубокие слои грунта. Технология особенно интересна при реконструкции исторических зданий, расположенных в условиях плотной городской застройки, где устройство крупногабаритной свайной системы может быть затруднено.

Современные исследования микросвай показывают, что эффективность усиления зависит не только от несущей способности отдельных свай, но и от характера взаимодействия системы «существующий фундамент – микросвая – грунтовое основание». Существенное значение имеет также последовательность передачи нагрузки и предварительное нагружение элементов усиления [11].

К основным преимуществам микросвайного усиления относятся:

- относительно небольшие габариты оборудования;
- возможность выполнения работ в ограниченном пространстве;
- возможность контролируемого включения элементов усиления в работу;
- снижение необходимости масштабной разборки существующего фундамента;
- возможность передачи нагрузки на более глубокие слои основания.

Ограничениями метода являются стоимость оборудования и работ, необходимость тщательного расчета взаимодействия элементов усиления с существующей конструкцией, а также необходимость контроля качества устройства свай.

Устройство плитного фундамента

В отдельных случаях, когда состояние существующего фундамента не позволяет обеспечить необходимую надежность и сохранение его конструкции невозможно, может рассматриваться вариант устройства нового плитного фундамента.

Такое решение может включать поэтапное разгружение здания, временное поддомкрачивание, демонтаж поврежденных участков фундамента, устройство новой железобетонной плиты и последующее контролируемое включение новой конструкции в работу.

Преимущество плитной схемы заключается в более равномерном распределении нагрузки по площади основания. Однако применение этого решения в объектах культурного наследия связано с существенным вмешательством в конструктивную систему здания и поэтому допустимо только при соответствующем научном, конструктивном и историко-культурном обосновании.

При выборе данного варианта необходимо также оценить возможность сохранения предмета охраны, состояние стен, перекрытий и других конструкций.

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что наиболее распространенным типом фундамента в исследованной выборке являются ленточные кирпичные фундаменты. Их широкое применение объясняется историческими строительными технологиями и доступностью кирпича в период формирования рассматриваемой застройки.

Главной проблемой является не столько сам материал фундамента, сколько длительное воздействие комплекса факторов. К ним относятся увлажнение кладки, циклическое замораживание и оттаивание, нарушение гидроизоляции, изменение режима грунтовых вод, неравномерность основания и изменение эксплуатационных нагрузок.

Особое значение имеет осадка. Современные экспериментальные исследования показывают, что реакция кирпичных зданий на осадку определяется совокупностью конструктивных факторов. В частности, большое влияние оказывают распределение массы здания, расположение проемов и жесткость перекрытий [5].

Следовательно, при выявлении трещин в фундаменте или стенах недостаточно выполнить локальный ремонт. Необходимо определить механизм их образования. Если причиной является продолжающаяся деформация основания, косметический ремонт кладки не устранит источник повреждения.

Современная концепция обследования исторических зданий предусматривает переход от локального ремонта к системному мониторингу состояния конструкции. Для исторической кладки могут использоваться визуальный контроль, измерение раскрытия трещин, геодезические наблюдения, георадарные методы, датчики деформаций и другие инструментальные методы [4].

При этом объем мониторинга должен соответствовать степени риска и характеру выявленных повреждений.

Важным результатом исследования является также необходимость дифференцированного подхода к реконструкции. Для фундамента с локальными дефектами может быть достаточно ремонтно-восстановительных мероприятий. При развитии осадки может потребоваться усиление основания. При значительном разрушении фундамента и невозможности обеспечить требуемую несущую способность может возникнуть необходимость в устройстве новой фундаментной системы.

Таким образом, три основных варианта можно представить следующим образом:

Вариант 1 – локальный ремонт.

Применяется при ограниченных повреждениях, отсутствии прогрессирующей деформации и достаточной несущей способности основания.

Вариант 2 – усиление существующего фундамента.

Может предусматривать инъекционное закрепление, устройство микросвай, увеличение опорной площади или другие мероприятия.

Вариант 3 – замена фундаментной системы.

Рассматривается при значительном разрушении существующего фундамента и невозможности обеспечить его надежность посредством локального усиления.

Для объектов культурного наследия приоритетным является вариант, который обеспечивает требуемую конструктивную безопасность при минимальном вмешательстве в историческую материю здания.

Выводы

На основании проведенного комплексного исследования фундаментов объектов культурного наследия исторического поселения города Краснодар можно сформулировать следующие выводы:

По результатам исследования более 50 объектов культурного наследия установлено, что около 97 % исследованных зданий имеют ленточные кирпичные фундаменты. Полученный показатель относится к исследованной выборке и характеризует именно рассмотренную совокупность объектов.

Наиболее распространенными дефектами фундаментов являются осадочные деформации, трещины, локальное разрушение кирпичной кладки, выбоины и нарушения гидроизоляции. Физический износ рассмотренных конструкций преимущественно находится в диапазоне 40–70 %.

Техническое состояние фундамента должно определяться не только по величине физического износа. Необходим комплексный анализ фактического состояния конструкции, ее несущей способности, характера деформаций и состояния основания в соответствии с действующими требованиями к обследованию зданий [1].

Значительное влияние на состояние исторических фундаментов оказывают инженерно-геологические и гидрогеологические условия. Поэтому разработка мероприятий по усилению должна выполняться после получения актуальных данных об инженерно-геологическом строении участка, характеристиках грунтов и уровне грунтовых вод.

Наиболее перспективными направлениями усиления исторических фундаментов являются инъекционные технологии и микросвайное усиление. Их преимущество заключается в возможности выполнения работ в условиях ограниченного пространства и потенциальном снижении объема вмешательства в существующую конструкцию.

Устройство нового плитного фундамента может рассматриваться при значительном разрушении существующей конструкции, однако для объектов культурного наследия такой вариант требует особого обоснования вследствие существенного вмешательства в конструктивную систему здания.

Для зданий с развивающимися деформациями целесообразно организовывать систематический мониторинг. Инструментальные наблюдения позволяют определить динамику повреждений и оценить эффективность мероприятий по усилению [4].

Выбор технологии реконструкции должен осуществляться индивидуально для каждого объекта с учетом его конструктивной схемы, состояния фундаментов и стен, инженерно-геологических условий, характера нагрузок и требований к сохранению предмета охраны.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенной последовательности обследования и выбора методов усиления при разработке проектных решений для объектов культурного наследия Краснодара и других исторических поселений с аналогичной конструктивной и инженерно-геологической спецификой.

Таким образом, реконструкция фундаментов объектов культурного наследия должна рассматриваться как комплексная научно-инженерная задача, объединяющая историко-архитектурный анализ, обследование конструкций, инженерно-геологические исследования, оценку напряженно-деформированного состояния и выбор минимально необходимого вмешательства. Применение современных технологий усиления в сочетании с систематическим мониторингом позволяет повысить надежность исторических зданий при одновременном соблюдении требований их сохранения.

Литература

1. ГОСТ 31937-2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М. : Стандартинформ, 2024.
2. Федеральный закон от 25.06.2002 № 73-ФЗ (ред. от 10.06.2026) «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» // Собрание законодательства Российской Федерации. – 2002. – № 26. – Ст. 2519.
3. ГОСТ Р 55528-2013. Состав и содержание научно-проектной документации по сохранению объектов культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования. – М. : Стандартинформ, 2014.
4. Soleymani A. Damage detection and monitoring in heritage masonry structures: Systematic review / A. Soleymani, H. Jahangir, M.L. Nehdi // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 397. – Art. 132402. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132402
5. Masonry buildings subjected to settlements: Half-scale testing, detailed measurements, and insights into behaviour / K.D. Dalgic [et al.] // Engineering Structures. – 2023. – Vol. 278. – Art. 115233. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115233
6. Приказ администрации Краснодарского края от 01.03.2019 № 26-кн (ред. от 13.02.2026) «Об утверждении предмета охраны, границ территории и требований к градостроительным регламентам в границах территории исторического поселения регионального значения город Краснодар Краснодарского края». – URL : https://base.garant.ru/43695474 (дата обращения 07.09.2026).
7. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М. : Минстрой России, 2016.
8. Yavartanoo F. Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions / F. Yavartanoo, T.H.-K. Kang // Journal of Building Engineering. – 2022. – Vol. 49. – Art. 103993. – DOI: 10.1016/j.jobe.2022.103993
9. Maheri M.R. Seismic rehabilitation of URM heritage-listed Namazi school building using multiple retrofitting techniques / M.R. Maheri, M.A. Najafgholipour, S. Zarandi // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 79. – Art. 107782. – DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107782
10. Hemeda S. PLAXIS 3D numerical analysis of complex geotechnical problems of colossal built heritage // npj Heritage Science. – 2024. – Vol. 12. – Art. 32. – DOI: 10.1038/s40494-024-01156-x
11. Effect of preloaded micropile on the foundation underpinning by centrifuge experiments // Geotechnical Engineering Letters. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 10–15. – DOI: 10.1680/jgele.20.00016
12. МБУ «Туристско-информационный центр» муниципального образования город Краснодар. Объекты культурного наследия по адресу: г. Краснодар, угол ул. Длинной, 123 и ул. Красной, 103. – URL : https://tourism.krd.ru/sights/849 (дата обращения 07.09.2026).

References

1. GOST 31937-2024. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition. – M. : Standartinform, 2024.
2. Federal Law № 73-FZ of June 25, 2002 «On Cultural Heritage Sites (Historical and Cultural Monuments) of the Peoples of the Russian Federation». Sobranie zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii. 2002. № 26. Art. 2519.

3. GOST R 55528-2013. Composition and content of scientific and design documentation for the preservation of cultural heritage sites. Historical and cultural monuments. General requirements. – M. : Standartinform, 2014.
4. Soleymani A. Damage detection and monitoring in heritage masonry structures: Systematic review / A. Soleymani, H. Jahangir, M.L. Nehdi // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 397. Art. 132402. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132402
5. Masonry buildings subjected to settlements: Half-scale testing, detailed measurements, and insights into behaviour / K.D. Dalgic [et al.] // Engineering Structures. 2023. Vol. 278. Art. 115233. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115233
6. Order of the Administration of Krasnodar krai № 26-kn of March 1, 2019 (as amended on February 13, 2026) «On approval of the subject of protection, territorial boundaries and requirements for urban planning regulations within the historical settlement of regional significance, the city of Krasnodar, Krasnodar krai». – URL : https://base.garant.ru/43695474 (date of application 7.09.2026).
7. SP 22.13330.2016. Foundations of Buildings and Structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83*. – M. : Ministry of Construction of Russia, 2016.
8. Yavartanoo F. Retrofitting of unreinforced masonry structures and considerations for heritage-sensitive constructions / F. Yavartanoo, T.H.-K. Kang // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 49. Art. 103993. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.103993
9. Maheri M.R. Seismic rehabilitation of URM heritage-listed Namazi school building using multiple retrofitting techniques / M.R. Maheri, M.A. Najafgholipour, S. Zarandi // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 79. Art. 107782. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107782
10. Hemeda S. PLAXIS 3D numerical analysis of complex geotechnical problems of colossal built heritage // npj Heritage Science. 2024. Vol. 12. Art. 32. DOI: 10.1038/s40494-024-01156-x
11. Effect of preloaded micropile on the foundation underpinning by centrifuge experiments // Geotechnical Engineering Letters. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 10–15. DOI: 10.1680/jgele.20.00016
12. Municipal Budgetary Institution “Tourist Information Center” of the municipal formation of the city of Krasnodar. Cultural heritage sites at the following address: Krasnodar, corner of Dolgaya Street, 123 and Krasnaya Street, 103. – URL: https://tourism.krd.ru/sights/849 (date of application 07.09.2026).

УДК 711.4.01

ЖИЛАЯ ФУНКЦИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕГЕНЕРАЦИИ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ГОРОДА

♦♦♦♦♦

RESIDENTIAL FUNCTION AS A TOOL FOR THE REGENERATION OF THE HISTORIC CITY CENTER

Шнурникова Елена Павловна
старший преподаватель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
shnurnikova@mail.ru

Веремьева Анастасия Валерьевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
nastushka514@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается роль жилой функции в процессах регенерации исторических центров современных городов. Исторически сложившиеся центральные территории обладают высокой архитектурной, культурной и градостроительной ценностью, однако в процессе развития города нередко приобретают преимущественно административный, деловой, торговый или туристический характер. Сокращение постоянного населения приводит к нарушению функционального баланса, снижению активности городской среды в вечернее время и постепенной утрате историческим центром свойств полноценной среды повседневной жизни. Включение новой жилой функции рассматривается как один из способов восстановления функциональной устойчивости исторической территории. Особое внимание уделяется принципам интеграции нового жилья в сложившуюся морфологию исторического города, сохранению масштаба застройки, уличного фронта, композиционных связей и архитектурной идентичности места. На примере исторического центра Краснодара рассматривается возможность формирования современной жилой застройки как элемента регенерации нарушенных участков городской ткани.

Ключевые слова: исторический центр, жилая функция, регенерация городской ткани, историческая среда, городская морфология, многофункциональность, адаптация, архитектурное наследие, Краснодар.

Shnurnikova Elena Pavlovna
Senior Lecturer of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
shnurnikova@mail.ru

Veremyeva Anastasia Valeryevna
Student,
Kuban State University of Technology
nastushka514@gmail.com

Annotation. This article examines the role of residential use in the regeneration of historic centers in modern cities. While historically established central areas possess significant architectural, cultural, and urban planning value, urban development often transforms them into zones dominated by administrative, business, commercial, or tourism functions. A decline in the permanent population disrupts the functional balance, reduces evening activity, and leads to the gradual loss of the historic center's character as a vibrant setting for everyday life. Introducing new residential functions is considered a strategy for restoring the functional sustainability of these historic areas. Special attention is paid to the principles of integrating new housing into the existing morphology of the historical city, preserving the scale of the development, the street frontage, compositional connections, and the architectural identity of the place. Using the historic center of Krasnodar as a case study, the article explores the potential for creating modern residential developments to regenerate compromised sections of the urban fabric.

Keywords: historic center, residential function, urban fabric regeneration, historic environment, urban morphology, multifunctionality, adaptation, architectural heritage, Krasnodar.

Введение

Исторический центр представляет собой одну из наиболее значимых частей городской структуры, поскольку именно в нем концентрируются устойчивые черты пространственного развития города, его архитектурная идентичность, система общественных пространств, масштаб и морфология застройки. Для Краснодара такая целостность особенно характерна: разновременные и разностилевые элементы исторической среды сформировались на общей планировочной основе и при различиях в архитектурном языке сохраняют соподчиненность квартальной структуре и близость типологических характеристик. Исторические улицы, площади, кварталы и отдельные здания в этом случае воспринимаются как единая пространственно-временная система, отражающая последовательные этапы развития городской среды [2, 4].

Исторический центр не может рассматриваться исключительно как территория сохранения архитектурного наследия. Его жизнеспособность напрямую зависит от возможности адаптации к современным социальным, экономическим и функциональным требованиям. К утрате исторического характера территории может привести, как и избыточная консервация среды, так и радикальная её трансформация.

Одной из актуальных проблем исторического центра становится состояние и дальнейшая судьба жилой функции. В исторической среде Краснодара одновременно присутствуют жилые здания, обладающие значительной историко-культурной ценностью, и малоценные либо ветхие постройки, находящиеся в неудовлетворительном состоянии. На фоне усиления административной, коммерческой, туристической и деловой функций это формирует необходимость дифференцированного подхода: ценные элементы требуют сохранения и приспособления, тогда как проблемные участки могут рассматриваться как ресурс для обновления жилой среды без вытеснения постоянного населения из центра [1, 3, 4].

Из-за этого формируется функционально насыщенная, но при этом не всегда жизнеспособная городская среда. Днем она может характеризоваться высокой активностью пешеходных и транспортных потоков, тогда как вечером и в выходные дни отдельные кварталы теряют такое интенсивное движение. В связи с этим развитие жилой функции может рассматриваться как один из главных инструментов регенерации исторического центр.

Исторический центр как жилая среда

Первоначально исторические центры формировались как многофункциональная среда, где жилье соседствовало с торговлей, ремеслом, административными и общественными учреждениями. В пределах одного квартала могли одновременно находиться жилые дома, мастерские, лавки, небольшие производства, образовательные учреждения и общественные пространства. Важной частью такой структуры становился двор – промежуточное частно-публичное пространство, связанное одновременно с домом и с жизнью локального сообщества [3, 4].

Такое функциональное и пространственное смешение поддерживало постоянную активность городской среды. Улица выполняла не только транспортную функцию, а двор не ограничивался хозяйственным назначением: вместе они формировали систему повседневных контактов жителей. Для исторических кварталов характерно восприятие двора как продолжения жилища, которое используется совместно соседями и становится местом общения и совместного времяпрепровождения [3, 4].

По мере развития города функциональная структура центра начинает меняться. Более экономически активные виды использования постепенно смешают жилую функцию. Первые этажи превращаются в магазины, рестораны и офисы, жилые здания становятся административными, а отдельные кварталы приобретают преимущественно общественно-деловой характер [1, 4].

Само по себе развитие общественных функций является естественным процессом. Проблема возникает в момент, когда происходит существенное нарушение функционального баланса. Исторический центр перестаёт быть полноценным жилым районом и начинает функционировать преимущественно как место работы, потребления, обслуживания или туристического посещения.

В таком случае возникает парадокс: территория может обладать высокой архитектурной ценностью, качественным благоустройством и развитой инфраструктурой, но при этом постепенно терять характер живого городского пространства.

Чем больше функций находится в непосредственной пространственной взаимосвязи, тем менее зависим район от маятниковой миграции и тем интенсивнее используется его общественная инфраструктура [3, 4].

Включение жилой функции следует рассматривать не только как увеличение количества квартир, но и как способ поддержания социального и функционального разнообразия центра.

Регенерация городской ткани

Особую роль новая жилая застройка может играть на территориях, где историческая ткань уже нарушена утратой зданий, появлением пустырей, парковок или других пространственных разрывов. В подобных условиях задача реконструкции выходит за пределы ремонта отдельных объектов и затрагивает восстановление архитектурной выразительности и целостности самой исторической среды. Новое строительство может становиться частью такого процесса, если подчиняется закономерностям сложившейся городской структуры [5, 7].

Пустующий участок внутри сложившегося исторического квартала является не просто свободной территорией. Он может нарушать непрерывность застройки, исторические красные линии, визуальные связи и масштаб улицы. В этом случае новое строительство становится инструментом градостроительной регенерации.

Задача заключается не в буквальном воспроизведении утраченного здания при отсутствии достаточных исторических оснований, а в восстановлении принципов организации городской ткани. Для Краснодара к ним относятся фиксация исторической красной линии, периметральный характер застройки, согласованная этажность, развитая дворовая структура и композиционное закрепление углов кварталов. Именно эти характеристики позволяют новому объекту продолжать морфологию исторической среды без прямой стилизации [2, 5, 6, 7].

К ним относятся:

- положение здания относительно красной линии;
- характер и протяжённость уличного фронта;
- масштаб и этажность;

- соотношение застроенного и открытого пространства;
- ритм фасадного членения;
- характер угловых акцентов;
- система дворов;
- взаимодействие первых этажей с общественным пространством.

Таким образом, современное жилое здание может выполнять функцию недостающего элемента исторического квартала. Его значение определяется не только собственной архитектурой, но и способностью восстановить пространственные отношения между уже существующими объектами.

Морфологическая преемственность вместо стилизации

Одной из наиболее сложных задач при проектировании жилья в историческом центре является определение характера архитектуры нового здания.

Можно выделить два крайних подхода:

Первый основан на стилизации нового объекта под историческую архитектуру. Визуально сблизить новую застройку со старой может помочь использование декоративных элементов, характерных материалов, арочных окон, карнизов и других цитат. Однако прямое копирование исторических форм способно привести к возникновению псевдоисторической среды и затруднить визуальное прочтение подлинных этапов развития города [7].

Второй подход предполагает намеренный контраст между новым и историческим. Он подчёркивает принадлежность здания к своему времени, однако при чрезмерной контрастности новый объект может разрушить масштаб и композиционную целостность улицы [7].

Наиболее продуктивным представляется принцип морфологической преемственности, при котором новая архитектура сохраняет не внешний набор исторических декоративных приемов, а устойчивые пространственные закономерности места [2, 5, 7].

В данном случае современное здание не повторяет исторический архитектурный язык буквально, но наследует структуру отношений между объемом и улицей. Его соответствие контексту определяется тем, насколько оно продолжает масштаб и ритм существующей застройки, поддерживает линию квартала и не нарушает сложившуюся систему визуальных и пространственных связей. Преемственность может проявляться через высоту карниза, масштаб фасадных элементов, вертикальное и горизонтальное членение, глубину проёмов, материал, положение относительно улицы, пластику угла и характер первого этажа [2, 5, 6, 7].

Такой подход позволяет одновременно сохранить временную идентифицируемость новой архитектуры и обеспечить её соответствие историческому контексту.

Угловая застройка как элемент городской композиции

Особое значение в исторической морфологии имеют здания, расположенные на пересечениях улиц. В застройке Екатеринодара углы нередко получали специальное композиционное решение, благодаря которому перекресток становился самостоятельным пространственным узлом [2, 8].

Угол квартала является наиболее визуально активной точкой городской ткани. Именно здесь пересекаются перспективы двух улиц и изменяется направление движения человека.

Поэтому историческая архитектура часто выделяет углы зданий специальными композиционными приёмами: башнями, эркерами, ризалитами, скруглениями или скошенными фасадами.

В историческом центре Краснодара подобные решения являются важными элементами пространственной организации перекрёстков.

При размещении современного жилого здания на незастроенном угловом участке использование аналогичной градостроительной логики может способствовать восстановлению композиционной завершённости квартала [7, 8].

Например, формирование скошенного углового фасада нового здания может поддерживать существующий исторический объект на противоположной стороне перекрёстка [8].

При этом речь идёт не о буквальном повторении его архитектурного оформления, а о воспроизведении принципа пространственного акцентирования угла [7, 8].

Возникает композиционный диалог:

историческое здание – пространство перекрёстка – современное здание.

За счёт этого новая архитектура становится не самостоятельным изолированным объектом, а частью более широкой градостроительной композиции.

Жильё и существующая инфраструктура исторического центра

Одним из аргументов в пользу размещения новой жилой функции в центральной части города является наличие уже сформированной инфраструктуры.

В отличие от периферийных районов нового строительства исторический центр, как правило, обладает развитой системой социальных, транспортных и общественных объектов.

В пешеходной или транспортной доступности располагаются образовательные учреждения, детские сады, медицинские организации, торговля, аптеки, предприятия общественного питания, культурные учреждения, административные объекты и остановки общественного транспорта [1, 4].

Следовательно, новое жильё интегрируется в уже существующую систему обслуживания.

В случае исторического центра Краснодара данная особенность выражена особенно заметно. Центральные кварталы характеризуются высокой концентрацией учреждений различного назначения и развитой транспортной сетью [1, 2, 5].

Это позволяет рассматривать размещение нового жилья как форму **уплотнения в пределах существующей инфраструктуры**, а не как создание автономного жилого комплекса [1, 4].

Такой принцип соответствует современному представлению о компактном городе, в котором основные повседневные функции находятся в пределах небольшой временной доступности [4].

При этом необходимо учитывать фактическую нагрузку на существующие школы, дошкольные учреждения, медицинские объекты и транспорт. Поэтому на стадии детальной разработки проекта требуется не только картографический анализ расположения инфраструктуры, но и оценка её пропускной способности.

Первые этажи и взаимодействие с улицей

Жилой дом в историческом центре не должен формировать закрытую границу между частным и городским пространством.

Особое значение имеют первые этажи.

Размещение здесь общественных функций позволяет обеспечить активное взаимодействие здания с улицей. Небольшие магазины, предприятия услуг, кафе, мастерские, офисы или культурные пространства создают постоянную пешеходную активность и поддерживают характер смешанной исторической среды [3, 4].

При этом важно избегать превращения первых этажей в непрерывную коммерческую витрину. Их функции должны соответствовать масштабу и характеру конкретного участка [3, 4].

Жилая функция и общественное пространство

Регенерация исторического центра невозможна исключительно средствами архитектуры зданий. Не менее значимым является качество пространства между ними.

Новое жильё может сопровождаться формированием небольших общественных пространств: расширений тротуара, озеленённых карманов, локальных площадок, мест кратковременного отдыха [9].

Особенно интересно сочетание таких пространств с объектами культурного наследия. Памятная площадка, расположенная напротив исторического здания, может выполнять одновременно несколько функций: обеспечивать небольшую пространственную паузу в структуре улицы, формировать место отдыха и давать информацию об истории окружающей застройки [3, 7].

В этом случае возникает принципиально новая связь между современным жилым объектом и наследием. Новое здание не просто «не мешает» памятнику, а участвует в раскрытии его значения.

Информационная табличка, историческая фотография или лаконичная схема могут направить взгляд человека на существующий объект и объяснить особенности его первоначальной и современной функций.

Таким образом, благоустройство приобретает образовательный характер и становится инструментом интерпретации исторического города [9].

Заключение

Одной из основных задач современной работы с историческими территориями является преодоление представления о центре как о пространстве, которое необходимо исключительно сохранять в неизменном состоянии.

Исторический город всегда являлся результатом последовательных трансформаций. Изменялись функции зданий, появлялись новые типологии, инженерные системы и транспорт.

Следовательно, жизнеспособность наследия заключается не в полном отказе от изменений, а в способности городской структуры принимать новые функции без утраты своих базовых характеристик.

Жильё в данном контексте особенно важно, поскольку оно возвращает историческому центру его первоначальное качество – быть местом повседневной жизни.

Не музей. Не исключительно туристический маршрут. Не только административно-деловой район. А полноценная часть города, в которой люди живут, работают, учатся, встречаются и проводят свободное время.

Именно поэтому новое жилое строительство при условии корректной интеграции может выступать не угрозой исторической среде, а способом её сохранения через использование.

В условиях нарушенной исторической ткани новое жилое строительство может выполнять дополнительную градостроительную функцию – восстанавливать утраченный фронт улиц, фиксировать углы кварталов, формировать пространственные связи между сохранившимися историческими объектами.

При этом основной принцип проектирования должен состоять не в буквальном воспроизведении исторической архитектуры, а в сохранении морфологической преемственности. Масштаб,

красные линии, этажность, ритм фасада, характер углового решения и взаимодействие первых этажей с улицей являются более существенными параметрами интеграции, чем прямое копирование декоративных элементов.

Для исторического центра Краснодара подобный подход особенно актуален. Сосуществование дореволюционных памятников, советской архитектуры и современной городской среды свидетельствует о многослойности территории. Новая жилая застройка может стать очередным этапом её развития при условии уважительного отношения к существующей структуре.

Таким образом, регенерация исторического центра предполагает переход от концепции сохранения отдельных объектов к сохранению **жизнеспособности всей городской системы**. В этом контексте жильё является не второстепенной функцией, а одним из основных механизмов поддержания исторического города как постоянно развивающейся среды.

Литература

1. Субботин О.С. Реорганизация существующей жилой застройки в исторической среде поселений (на примере Краснодара) // Жилищное строительство. – 2017. – № 8. – С. 20–24.
2. Маркова О.Н. Опыт типологического анализа исторической застройки города Краснодара // Наследие веков. – 2019. – № 1(17). – С. 112–126.
3. Грозовская С.В. Городская морфология исторических центров Самары и Тбилиси и практики социального взаимодействия жителей // Вестник антропологии. – 2022. – № 1. – С. 84–103.
4. Глазычев В.Л. Урбанистика. – М. : Европа, 2008. – 219 с.
5. Субботин О.С. Особенности реконструкции исторической застройки городского центра Краснодара // Жилищное строительство. – 2011. – № 4. – С. 7–9.
6. Приказ администрации Краснодарского края от 01.03.2019 № 26-кн «Об утверждении предмета охраны, границ территории и требований к градостроительным регламентам в границах территории исторического поселения регионального значения город Краснодар Краснодарского края».
7. Щенков А.С. Реконструкция исторической застройки в Европе во второй половине XX в.: историко-культурные проблемы. – М. : ЛЕНАНД, 2011. – 280 с.
8. Шнурникова Е.П. Анализ фасадов угловых зданий в условиях квартальной застройки исторического поселения города Краснодара / Е.П. Шнурникова, А.А. Волкова // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2026.
9. Сокольская О.Н. Реновация кварталов исторического центра города Краснодара / О.Н. Сокольская, В.И. Брагин, Н.А. Дубиненко // Молодежная наука: сборник лучших научных работ молодых ученых: материалы LII студенческой научной конференции. – Краснодар : КубГТУ, 2025.

References

1. Subbotin O.S. Reorganization of existing residential development in the historic urban environment (using Krasnodar as an example) // Housing Construction. – 2017. – № 8. – P. 20–24.
2. Markova O.N. Experience of typological analysis of historic development in the city of Krasnodar // Heritage of Centuries. – 2019. – № 1(17). – P. 112–126.
3. Grozovskaya S.V. Urban morphology of the historic centers of Samara and Tbilisi and residents' social interaction practices // Bulletin of Anthropology. – 2022. – № 1. – P. 84–103.
4. Glazychev V.L. Urban Studies. – M. : Evropa, 2008. – 219 p.
5. Subbotin O.S. Specifics of the reconstruction of historic development in the city center of Krasnodar // Housing Construction. – 2011. – № 4. – P. 7–9.
6. Order of the Krasnodar Krai Administration dated March 1, 2019, № 26-kn «On Approval of the Subject of Protection, Territory Boundaries, and Requirements for Urban Planning Regulations within the Boundaries of the Historic Settlement of Regional Significance: The City of Krasnodar, Krasnodar krai».
7. Shchenkov A.S. Reconstruction of historic development in Europe in the second half of the 20th century: historical and cultural issues. – M. : LENAND, 2011. – 280 p.
8. Shnurnikova E.P. Analysis of corner building facades within the block-based development of the historic settlement of Krasnodar / E.P. Shnurnikova, A.A. Volkova // Urban Planning. Infrastructure. Communications. – 2026.
9. Sokolskaya O.N. Renovation of the quarters in the historical center of the city of Krasnodar / O.N. Sokolskaya, V.I. Bragin, N.A. Dubinenko // Youth Science: a collection of the best scientific papers by young scientists: materials of the LII Student Scientific Conference. – Krasnodar : KubGTU, 2025.

УДК 711.4

ИНТЕГРАЦИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПЛОЩАДЕЙ В ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫЙ КАРКАС ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ГОРОДА (НА ПРИМЕРЕ Г. КРАСНОДАРА)

♦♦♦♦♦

INTEGRATION OF PUBLIC SQUARES INTO THE ROAD TRANSPORT FRAME OF THE HISTORIC CITY CENTER (ON THE EXAMPLE OF KRASNODAR)

Шнурникова Елена Павловна
старший преподаватель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
shnurnikova@mail.ru

Столбикова Ангелина Анатольевна
студентка кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
Stolbikovaaa02@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема интеграции общественных пространств в транспортную структуру исторического центра города. Сформулирована типология площадей по характеру взаимодействия с транспортной сетью (площадь-остров, площадь-фасад, площадь-скрещение, полупешеходная площадь), определены проектные требования к каждому типу. На примере исторического центра Краснодара – города со статусом исторического поселения регионального значения и прямоугольной планировочной структурой – проанализированы существующие общественные пространства различного функционального типа: Главная городская (Театральная) площадь, площадь перед автовокзалом, сквер Дружбы, площадь перед Дворцом культуры железнодорожников и Привокзальная площадь вокзала Краснодар-1. Выявлены систематические нарушения действующих нормативов. Сделан вывод о необходимости системного пересмотра транспортной и экологической политики в историческом центре с приоритетом пешеходов, стационарного озеленения и соблюдения предмета охраны исторического поселения.

Ключевые слова: общественные площади, благоустройство, Краснодар, исторический центр, дорожно-транспортный каркас, градостроительное проектирование.

Shnurnikova Elena Pavlovna
Senior Lecturer of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
shnurnikova@mail.ru

Stolbikova Angelina Anatolyevna
Student of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
Stolbikovaaa02@mail.ru

Annotation. The article examines the problem of integrating public spaces into the transport structure of the historic city center. A typology of areas is formulated by the nature of interaction with the transport network (area-island, area-facade, area-crossing, semi-pedestrian area), design requirements for each type are determined. Using the example of the historical center of Krasnodar - a city with the status of a historical settlement of regional significance and a rectangular planning structure - the existing public spaces of various functional types are analyzed: the Main City (Theater) Square, the square in front of the bus station, Friendship Square, the square in front of the Palace of Culture of Railway Workers and Railway Station Square Krasnodar-1. Systematic violations of existing standards were revealed. It was concluded that it is necessary to systematically revise the transport and environmental policy in the historical center with a priority for pedestrians, stationary landscaping and compliance with the subject of protection of the historical settlement.

Keywords: public squares, landscaping, Krasnodar, historical center, road transport frame, urban planning.

Общественные пространства, улицы, площади и парки создают в условиях плотной городской застройки благоприятный фон для общения, отдыха, проведения мероприятий. Остро стоит проблема интеграции подобных пространств в транспортную структуру населённого пункта, это является классической задачей градостроительной теории и практики [1]. С одной стороны, транспортный каркас обеспечивает доступность и функциональную жизнеспособность общественного пространства; с другой – транзитные потоки, парковочная нагрузка и инфраструктура транспорта часто вступают в конфликт с пешеходной природой площади как места пребывания людей, а не транзита.

В исторических центрах этот конфликт усложняется: сложившийся контур застройки, охранные зоны объектов культурного наследия, узкие улицы в пределах исторических красных линий и сложившийся рисунок кварталов не позволяют применять стандартные решения – расширение проезжей части, устройство развязок, снос ветхой застройки. Историческая среда задаёт жёсткие параметры, в которые транспортная и пространственная модели должны успешно интегрироваться.

В теории транспортного планирования дорожно-транспортный каркас описывается через понятия «пропускная способность», «уровень загрузки», «конфликтные точки». Площадь в этом контексте – это точка перераспределения потоков: транспортные потоки могут расходиться по нескольким направлениям, а пешеходные – концентрироваться и рассеиваться.

По соотношению с транспортной сетью выделяются четыре типа площадей:

- Площадь-остров – со всех сторон окружена движением, пешеходы попадают по переходам. Характерна для площадей, сформированных в середине XX в. с приоритетом автомобильного движения;
- Площадь-фасад – примыкает к транспортной магистрали одной стороной, три стороны образованы застройкой. Наиболее распространённый тип в исторических центрах российских городов;
- Площадь-скрещение – транспортные потоки пересекают площадь по одной-двум осям, остальное пространство – пешеходное. Классический европейский тип;
- Полупешеходная площадь – транспортный доступ ограничен (спецтранспорт, такси, доставка). Перспективный тип для узких улиц исторического центра.

Каждый тип требует своего набора проектных решений: площадь-остров нуждается в безопасных переходах и визуальной идентификации; площадь-фасад – в активных первых этажах и благоустройстве тротуара; площадь-скрещение – в чётком разделении транспортных и пешеходных зон; полупешеходная – в обходных маршрутах и режиме регулирования.

Исторический центр Краснодара сформирован на основе регулярного плана XIX в. – прямоугольная сетка небольших кварталов с магистралями (ул. Красная, ул. Ставропольская) и узкими второстепенными улицами (Гимназическая, Рашпилевская, Гоголя). Проспекты отсутствуют. Такая структура создаёт три характерные особенности: [2]

- Высокую транзитную проходимость по магистралям – потенциальный пассажиропоток для формирования площадей;
- Недостаток мест для отдыха – поток людей движется по улице без остановки, теряются социальная и рекреационная функции исторического центра города;
- Конфликт транспорта и пешеходов на узких улицах – тротуары слишком узки для комфортного пешеходного использования, особенно в часы пик, сложно выделить пространство под веломаршруты.

Особенно важно учесть эти особенности для исторических городов, где важно сохранить планировочную структуру и оставить нетронутыми памятники архитектуры. Предмет охраны, границы территории и требования к градостроительным регламентам в границах исторического поселения регионального значения г. Краснодар включает в себя: [3]

- планировочную структуру исторического центра (прямоугольная сетка кварталов, направления главных улиц);
- силуэт застройки (соотношение высоты зданий к ширине улиц, доминанты);
- характер застройки (материал, стилистика, этажность);
- композиционные оси и видовые коридоры (перспективы на знаковые здания);
- характер ограждений, мощения, озеленения.

Эти требования напрямую влияют на проектирование площадей: материалы благоустройства, высота малых архитектурных форм, тип озеленения, режим освещения – всё должно соответствовать предмету охраны.

Рассмотрим общественные пространства в историческом центре Краснодара:

Театральная площадь – представительская площадь (рис. 1). Функция: культурно-зрелищная, место проведения городских мероприятий. Транспорт: примыкает к ул. Красной, парковочных мест недостаточно.



Рисунок 1 – Театральная площадь

Площадь представляет собой территорию, вымощенную плиткой. В центре площади находится комплекс фонтанов, задающий масштаб и характер площади. Подобные динамичные объекты помогают сделать температуру воздуха благоприятнее для человека за счёт испарения воды. Озеленение представлено деревьями в кадках, установлены лавки. По нормам СП 82.13330.2016 и Местным нормативам Краснодара, площадь озеленения общественных пространств должна составлять не менее 40 % от территории, на Главной площади озеленения не хватает [4].

Площадь перед автовокзалом (ул. Гаврилова) – распределительная. Функция: приём пассажиров междугородних автобусов. Транспорт: примыкает к магистрали, перегрузка в часы прибытия/отправления.

Сквер Дружбы (ул. Рашпилевская) – рекреационное пространство локального значения. Функция: повседневный отдых жителей. Транспорт: ограниченный доступ.

Площадь перед ДК Железнодорожников (ул. Гоголя) – социально-бытовая (рис. 2). Функция: локальный центр района железнодорожников. Транспорт: примыкает к ул. Гоголя.

Площадь должна быть «организованным пространством» – фактически пространство перед ДК не организовано: нет чёткого периметра, нет разделения пешеходной и транспортной зон, нет навигации [5]. Катастрофически не хватает парковочных мест. В вечернее время (начало мероприятий) автомобили парируются на прилегающих улицах, блокируя тротуары и проезжую часть ул. Братьев Дроздовых, что создаёт конфликт с транзитным транспортом и пешеходами.

Недостаточное количество малых архитектурных форм, отсутствие системы навигации и архитектурной подсветки.

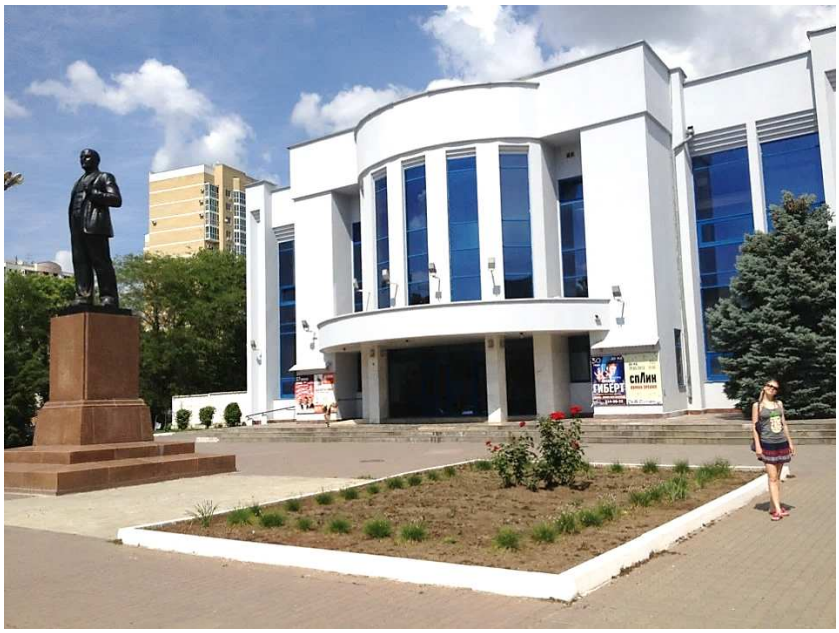


Рисунок 2 – Площадь перед ДК Железнодорожников

Привокзальная площадь Краснодар-1. Вокзал Краснодар-1 является крупнейшим транспортным узлом Юга России, а также объектом культурного наследия региона (рис. 3). Поток пассажиров после ограничения авиасообщения в 2022 году вырос на 75 %. При этом привокзальная площадь «Краснодар-1» – всего 5,3 га, что меньше, чем площадь у «Краснодар-2» (6,5 га) или у Торгового центра «Галерея» (4 га, но с существенно большей пропускной способностью) [6].

Примерно две трети территории площади заняты автобусными карманами и платной парковкой для легковых машин. Также существуют проблемы движения и остановок нелегального такси, перенасыщения воздуха выхлопными газами из-за скопления транспорта. На пешеходные функции приходится менее 20 % территории площади, что явно недостаточно для пассажиропотока свыше 3 млн человек в год. Дефицит скамеек, урн, навесов, удобной навигации, отсутствие полноценной пересадки на общественный транспорт со стороны улицы Ставропольской и общая неблагоприятная обстановка площади – всё это создаёт негативное впечатление как у жителей Краснодара, так и у туристов [7].

Разгрузить Привокзальную площадь позволит распределение пассажиропотока между двумя выходами. Создание площади со стороны Ставропольской, благоустройство пешеходного моста и удобной остановки общественного транспорта снизит нагрузку на троллейбусное

кольцо на улице Мира и создаст безопасное и комфортное пространство для ожидания и отдыха пассажиров и туристов.



Рисунок 3 – Привокзальная площадь Краснодар-1

Анализ показывает, что в историческом центре Краснодара отсутствует полноценная система общественных площадей. Существующие пространства изолированы друг от друга, не образуют связной пешеходной сети, и их функциональное наполнение не соответствует потребностям потока людей. Особенно дефицит ощущается в зоне вокзального узла.

Прямоугольная сетка исторического центра создаёт условия для непрерывного движения потока людей по улицам. Пешеходы перемещаются по тротуарам, но не имеют мест для отдыха, ожидания, пересадки вне транспортного потока. Это снижает качество пешеходной среды и социальную активность.

С 2015 года в Краснодаре действует программа «Доступная среда», которая позволила обустроить в городе 1,5 тыс. объектов для интеграции маломобильных граждан в социум и обеспечения им равного доступа к инфраструктуре, образованию и работе. Однако несмотря на прогресс, остаётся ещё много нерешённых задач, в том числе и в области организации общественных пространств [8].

Действующие нормативы устанавливают чёткие требования к озеленению, пешеходной доступности, сохранению историко-градостроительной среды. Однако на практике эти требования систематически нарушаются.

Приведение площадей в соответствие с нормативами требует не точечного благоустройства, а системного пересмотра транспортной и экологической политики в историческом центре – с приоритетом пешеходов, стационарного озеленения и сохранения предмета охраны исторического поселения.

Литература

1. Крашенинников А.В. Градостроительное развитие малых и средних городов. – М. : Архитектура-С, 2014. – 304 с.
2. Градостроительная топография исторического поселения города Краснодара XIX–XX веков // КиберЛенинка : научная электронная библиотека. – URL : cyberleninka.ru (дата обращения 02.09.2026).
3. Рысин Ю.В. Исторические поселения Северо-Западного Кавказа: трансформации статуса и перспективы сохранения и актуализации архитектурно-градостроительного наследия / Ю.В. Рысин, В.В. Бондарь // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 3. – С. 99–105.
4. Об утверждении Местных нормативов градостроительного проектирования муниципального образования город Краснодар: решение городской Думы Краснодара от 19 июля 2012 г. № 32 п. 13 (с изм.) // Офиц. сайт администрации муниципального образования город Краснодар. – URL : krd.ru (дата обращения 16.08.2026).
5. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений (с изм. № 1–4) // Минстрой России. – URL : krd.ru (дата обращения 10.08.2026).

6. СП 395.1325800.2018. Транспортно-пересадочные узлы. Правила проектирования (с изм. № 1) // Минстрой России. – URL : docs.cntd.ru (дата обращения 02.09.2026).
7. Концепция развития привокзальных территорий г. Краснодара / Бюро МЛА+. – 2024. – 42 с.
8. Шнурникова Е.П. Реконструкция городской застройки с учетом доступности маломобильных групп населения на примере г. Краснодара / Е.П. Шнурникова, С.П. Горзова, В.В. Кононенко // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19. – № 7. – С. 1069–1078. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1069-1078

References

1. Krasheninnikov A.V. Urban development of small and medium-sized cities. – M. : Architecture-S, 2014. – 304 p.
2. Urban planning topography of the historical settlement of the city of Krasnodar of the XIX–XX centuries // CyberLeninka: scientific electronic library. – URL : cyberleninka.ru (date of application 02.09.2026).
3. Rysin Yu.V. Historical settlements of the North-West Caucasus: status transformations and prospects for preserving and updating the architectural and urban planning heritage / Yu.V. Rysin, V.V. Bondar // Academia. Architecture and construction. – 2016. – № 3. – P. 99–105.
4. On approval of local standards for urban planning of the municipality of the city of Krasnodar: decision of the City Duma of Krasnodar dated July 19, 2012 № 32, paragraph 13 (as amended) // Office. website of the administration of the municipality of the city of Krasnodar. – URL : krd.ru (date of application 16.08.2026).
5. SP 42.13330.2016. Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements (with rev. № 1–4) // Ministry of Construction of Russia. – URL : krd.ru (date of application 10.08.2026).
6. SP 395.1325800.2018. Transport hubs. Design Rules (rev. № 1) // Ministry of Construction of Russia. – URL : docs.cntd.ru (date of application 02.09.2026).
7. Concept for the development of the station territories of Krasnodar / Bureau of MLA+. – 2024. – 42 p.
8. Shnurnikova E.P. Reconstruction of urban development, taking into account the availability of people with limited mobility, using the example of Krasnodar / E.P. Shnurnikova, S.P. Gorzova, V.V. Kononenko // Bulletin of MGSU. – 2024. – Vol. 19. – № 7. – P. 1069–1078. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1069-1078

УДК 711.4.01

АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ ИНТЕГРАЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ЗАСТРОЙКИ В ИСТОРИЧЕСКУЮ ГОРОДСКУЮ СРЕДУ

♦♦♦♦♦

ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING PRINCIPLES FOR INTEGRATING MODERN CONSTRUCTION INTO THE HISTORICAL URBAN ENVIRONMENT

Шнурникова Елена Павловна
старший преподаватель кафедры архитектуры гражданских и промышленных зданий им. А.В. Титова,
Кубанский государственный технологический университет
shnurnikova@mail.ru

Фотиева Вера Алексеевна
студентка,
Кубанский государственный технологический университет
vera.fotieva@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматриваются особенности интеграции современной архитектуры в историческую городскую среду. Актуальность исследования связана с необходимостью сочетания современного развития города с сохранением пространственного и визуального характера исторической застройки. Цель работы заключается в выявлении и систематизации основных принципов, позволяющих включать современные архитектурные объекты в сложившуюся историческую среду без прямого копирования её архитектурных форм. В исследовании рассматриваются пространственная структура, масштаб и соразмерность, ритм застройки, визуальные связи, характер уличного фронта и взаимодействие зданий с общественными пространствами. Для выявления особенностей различных способов интеграции проведён сравнительный анализ примеров современной архитектуры в историческом окружении. На основе анализа сформулированы принципы пространственного соответствия, соразмерности, управляемого контраста, визуальной преемственности, сохранения значимых визуальных связей, общественной интеграции и временной читаемости. Сделан вывод о том, что успешная интеграция современной архитектуры определяется не внешним сходством с исторической застройкой, а характером её связи с существующей пространственной, визуальной и общественной структурой города.

Ключевые слова: историческая городская среда, современная архитектура, интеграция, архитектурная преемственность, историческая застройка, градостроительная структура, архитектурный контекст.

Shnurnikova Elena Pavlovna
Senior Lecturer of the Department of Architecture of Civil and Industrial Buildings named After A.V. Titov,
Kuban State Technological University
shnurnikova@mail.ru

Fotieva Vera Alekseevna
Student,
Kuban State Technological University,
vera.fotieva@yandex.ru

Annotation. The article examines the features of integrating modern architecture into the historical urban environment. The relevance of the study is linked to the need to combine the modern development of the city with the preservation of the spatial and visual character of the historical building stock. The aim of the work is to identify and systematize the main principles that make it possible to incorporate modern architectural objects into the existing historical environment without directly copying its architectural forms. The study examines the spatial structure, scale and proportionality, the rhythm of the building stock, visual connections, the character of the street front, and the interaction of buildings with public spaces. To identify the features of various integration methods, a comparative analysis of examples of modern architecture in historical surroundings was carried out. Based on the analysis, the principles of spatial correspondence, proportionality, controlled contrast, visual continuity, preservation of significant visual connections, social integration, and temporal readability have been formulated. It has been concluded that the successful integration of modern architecture is determined not by its external similarity to historical buildings, but by the nature of its connection with the existing spatial, visual, and social structure of the city.

Keywords: historical urban environment, modern architecture, integration, architectural continuity, historical development, urban planning structure, architectural context.

Современный город постоянно меняется, появляются новые здания, общественные пространства, транспортные связи и новые функции, которые постепенно изменяют уже сложившуюся городскую среду. Особенно сложным этот процесс становится на территориях, которые имеют историческую и архитектурную ценность. Здесь уже существует определённая система улиц и кварталов, сформирован характер застройки, сложился узнаваемый образ пространства, поэтому появление нового архитектурного объекта требует учитывать не только современные потребности, но и особенности окружающей среды [2; 3].

Исторические территории занимают важное место в структуре города. Они сохраняют архитектурные и градостроительные особенности разных периодов его развития, формируют

его образ и во многом связаны с исторической памятью жителей. При этом историческая среда не может оставаться полностью неизменной, ведь без возможности её развития, она может постепенно потерять свою актуальность и функциональную привлекательность.

Одной из наиболее сложных задач в такой ситуации становится размещение современной архитектуры рядом с исторической застройкой. Новое здание неизбежно влияет на восприятие окружающего пространства. Его высота, объём, расположение, фасады и материалы могут как поддержать существующий характер территории, так и вступить с ним в конфликт.

Поэтому важным становится поиск подхода, при котором современная архитектура не копирует историческую, но учитывает основные закономерности сложившийся среды.

Такой подход позволяет рассматривать историческую среду не как статичную систему, которую необходимо полностью сохранить в существующем виде, а как пространство, способное развиваться при сохранении наиболее важных характеристик. В этом случае новое строительство становится частью уже существующей городской структуры, а не отдельным объектом, который существует независимо от своего окружения [2; 3].

Основная гипотеза исследования заключается в том, что современная архитектура может успешно интегрироваться в историческую среду без прямого копирования существующих архитектурных форм. Для этого необходимо учитывать основные характеристики сложившейся городской среды: её масштаб, пропорции, ритм, характер уличного фронта, визуальные связи и особенности взаимодействия зданий с общественными пространствами.

Историческая городская среда складывается постепенно, в течение длительного времени, и представляет собой сочетание архитектурных, пространственных, функциональных и визуальных элементов. В отличие от отдельного исторического здания, она включает целую систему взаимосвязанных объектов и пространств: улицы, кварталы, площади, здания, дворы и общественные территории. Вместе они формируют определённый характер города и влияют на то, как человек воспринимает и использует пространство [3].

Одной из главных особенностей исторической среды является её пространственная целостность. Она складывается не только благодаря сохранению отдельных исторических зданий, но и благодаря тому, как эти здания связаны между собой. Важную роль играют расстояния между объектами, направление улиц, характер площадей, визуальные перспективы и последовательность восприятия пространства человеком [2; 3].

Поэтому даже большое количество сохранившихся исторических зданий не всегда означает, что исторический характер территории сохранён. Существенное изменение высотности, линии застройки или пространственной структуры может значительно повлиять на восприятие среды, даже если сами ценные объекты остаются на месте.

Важной характеристикой исторической среды является масштаб. Он определяет соотношение размеров зданий между собой и их связь с человеком и окружающим пространством. Масштаб проявляется в высоте и ширине зданий, размерах фасадных элементов, ширине улиц, расстояниях между зданиями и размерах общественных пространств. В исторической среде эти параметры обычно формируются постепенно, поэтому их резкое изменение может восприниматься особенно заметно [2; 3].

С масштабом связан и ритм архитектуры, благодаря которой отдельные здания воспринимаются как части одной улицы. При этом здания не обязательно должны быть выполнены в одном стиле. Общий ритм и масштаб могут объединять архитектуру разных периодов [2].

Отдельно стоит отметить визуальные связи и архитектурные доминанты. Историческая территория часто имеет определённую систему ориентиров: отдельные выразительные здания, вертикальные акценты, перспективы улиц, они помогают человеку ориентироваться в пространстве и формируют его образ. Новая застройка может поддерживать эту систему или, наоборот, перекрывать важные виды и создавать конкурирующие доминанты.

Таким образом, историческая городская среда представляет собой целостную систему, в которой архитектура, улицы, открытые пространства и визуальные связи взаимосвязаны.

Особенно заметно эта проблема проявляется при строительстве новых зданий. Новый объект становится частью уже существующей городской структуры и начинает влиять на неё своим объёмом, высотой, расположением, функцией и архитектурным обликом. Поэтому рассматривать его только как отдельное произведение архитектуры недостаточно. Необходимо учитывать, каким образом он будет восприниматься вместе с окружающей застройкой [2; 3].

Более гибким представляется контекстуальный подход, при котором новая архитектура не копирует существующие здания, а учитывает особенности места. В этом случае внимание переносится с отдельных декоративных элементов на более общие характеристики: масштаб, пропорции, ритм, высотную структуру, линию застройки, визуальные связи и характер общественного пространства [2; 3].

При появлении нового здания в исторической среде необходимо определить характер его взаимодействия с существующей застройкой. Единого универсального решения здесь не

существует, поскольку подход зависит от масштаба территории, характера окружающих объектов и особенностей самого нового здания.

Условно можно выделить четыре основных варианта: стилистическое продолжение, контрастное решение, нейтральную интеграцию и контекстуальную интерпретацию.

Стилистическое продолжение предполагает использование приёмов, характерных для окружающей застройки: близких пропорций, материалов, цветовых решений, характера оконных проёмов и композиции фасада. Такой подход позволяет создать визуальную связь с исторической средой, однако при буквальном воспроизведении исторических форм существует риск стилизации. Кроме того, внешнее сходство не всегда позволяет выразить современные функции и технологии [2].

Контрастный подход основан на намеренном различии между старым и новым. Современное здание может отличаться формой, материалами и архитектурной пластикой, сохраняя при этом связь с окружающей средой через пространственную структуру, масштаб и визуальные связи.

Нейтральная интеграция предполагает более сдержанное решение, при котором новое здание не копирует историческую архитектуру и не стремится стать самостоятельной доминантой. Основная задача такого подхода – поддержать существующий характер пространства и не нарушать его целостность [2].

Наиболее комплексным можно считать контекстуальный подход [4]. В этом случае внимание уделяется не отдельным декоративным элементам, а закономерностям, которые формируют характер территории: масштабу зданий, ритму фасадов, структуре кварталов, направлению улиц, характеру первых этажей и соотношению открытых и застроенных пространств. Благодаря этому современная архитектура может не копировать историческую, но сохранять с ней связь на более глубоком уровне [2; 3].

При этом два здания могут значительно различаться по стилю, но хорошо взаимодействовать благодаря близкому масштабу, ритму и пространственным отношениям. И наоборот, внешне похожие объекты могут конфликтовать, если один из них значительно превышает окружающую застройку по высоте или объёму.

Поэтому интеграцию необходимо рассматривать сразу на нескольких уровнях: пространственном, визуальном, функциональном и композиционном.

Попытка решить проблему интеграции только за счёт внешнего оформления здания не всегда является эффективной. Традиционные материалы, декоративные элементы и характерная цветовая гамма могут создать визуальное сходство с исторической застройкой, но не компенсируют чрезмерную высоту, большой объём или нарушение важных визуальных связей.

Поэтому интеграция начинается не только с фасада, а прежде всего с места здания в городской структуре. Необходимо учитывать его положение относительно улиц и общественных пространств, взаимодействие с существующими зданиями и влияние на основные визуальные направления. Только после этого можно переходить к формированию архитектурного образа.

Особенно это важно для общественных и многофункциональных объектов, которые часто имеют больший объём и более сложную функциональную структуру. Задача заключается не в том, чтобы скрыть их современный характер, а в том, чтобы найти подходящий способ включения в существующую среду [2].

Историческая среда может выступать не только ограничением для нового строительства, но и источником архитектурных решений. Масштаб улицы может определять размер нового объёма, существующий ритм – характер его членения, а система общественных пространств – расположение входов и открытых зон [2; 3].

В таком случае архитектор не просто пытается «вписать» готовое здание в существующее окружение, а учитывает особенности места уже на начальном этапе проектирования. При этом новое здание само становится частью дальнейшего развития территории и может создавать новые общественные связи и функции [1].

Таким образом, интеграция современной архитектуры не сводится ни к копированию исторических форм, ни к созданию намеренного контраста. Главным становится характер связи нового объекта с существующей пространственной и визуальной структурой. Это позволяет перейти к анализу конкретных архитектурных примеров.

Перейдем от теоретических положений к конкретным примерам. Для анализа выбраны четыре объекта: Пирамида Лувра в Париже, реконструкция Neues Museum в Берлине, James-Simon-Galerie в Берлине и башня Montparnasse в Париже.

Одним из наиболее известных примеров современной архитектуры в историческом окружении является Пирамида Лувра, спроектированная архитектором И.М. Пеем. Объект был создан в рамках модернизации Лувра в 1980-х годах и стал новым входом в музейный комплекс. Стеклянная конструкция высотой около 21 метра заметно отличается от исторической архитектуры дворца по форме и материалам, поэтому на этапе проектирования её появление вызвало значительные споры. Однако контраст здесь не является случайным: пирамида расположена в соответствии с основными осями двора, а её геометрия связана с существующей

пространственной структурой. Прозрачность стекла также позволяет сохранять визуальную связь с историческими фасадами [5].



Фото 1 – Пирамида Лувра

Таким образом, связь в данном случае строится не на внешнем сходстве, а на пространственной и визуальной организации. Пирамида не повторяет исторические формы, но учитывает геометрию двора, основные направления и перспективы. Этот пример показывает, что современная архитектура может значительно отличаться от исторической по своему образу и при этом становиться частью существующего ансамбля, если она учитывает структуру места [2; 5].

Другой вариант взаимодействия нового и исторического можно увидеть в реконструкции Neues Museum в Берлине, выполненной Дэвидом Чипперфильдом совместно с Джулианом Харрапом. Историческое здание было построено в XIX веке, а после значительных военных разрушений его восстановление и дополнение проводились уже в XXI веке. В данном случае задача заключалась не в создании полностью самостоятельного нового объекта, а в сохранении и дальнейшем развитии существующего здания. При этом новые элементы не скрываются под видом исторических, а остаются визуально различимыми [6].



Фото 2 – Neues Museum

Основным принципом проекта стало сохранение пространственной логики, масштаба и основных пропорций исторического здания при использовании современного архитектурного языка. Новые части не копируют разрушенные элементы, в результате исторические и современные элементы можно различать, однако они воспринимаются как части единого объекта. Этот пример показывает, что архитектурная преемственность может основываться не на одинаковых материалах и декоративных деталях, а на сохранении структуры и характера существующего здания.

James-Simon-Galerie на Музейном острове в Берлине представляет ещё один вариант взаимодействия современной архитектуры с исторической средой. Здание, спроектированное David Chipperfield Architects и открытое в 2019 году, стало новым входным и общественным

центром музейного комплекса. Оно расположено между Kupfergraben и Neues Museum и связано с окружающими зданиями не только визуально, но и функционально. Через него организованы входы, сервисные функции и связи между несколькими музеями [7].



Фото 3 – James-Simon-Galerie

Особенность проекта заключается в современной интерпретации исторического мотива колоннад. Тонкие колонны, стеклянные поверхности и открытые пространства создают визуальную связь с архитектурой Музейного острова, но не копируют её буквально. При этом колоннада участвует в формировании нового двора и организации пешеходных и общественных связей. Таким образом, исторический мотив используется не только как декоративный элемент, а становится частью пространственного решения. Этот пример показывает возможность сохранения связи с историческим контекстом через современную интерпретацию его характерных особенностей.

В качестве противоположного примера можно рассмотреть башню Montparnasse в Париже. Она была построена в 1969–1973 годах в рамках преобразования района вокруг вокзала Montparnasse. Здание имеет высоту около 210 метров и 59 этажей и значительно отличается от традиционного силуэта центрального Парижа. В данном случае современная архитектура стала крупным самостоятельным объектом, заметно влияющим на восприятие окружающей городской структуры [8].



Фото 4 – Башня Montparnasse

Основной проблемой стало соотношение масштаба здания с историческим городским окружением. Значительная высота башни и её влияние на городской силуэт стали одной из главных причин критики проекта. При этом проблема заключается не только в современном архитектурном языке, а прежде всего в масштабе объекта и его влиянии на визуальное восприятие города. Этот пример показывает, что даже самостоятельная современная архитектура

может вступать в конфликт с исторической средой, если её масштаб существенно нарушает сложившуюся пространственную и визуальную структуру [2; 3].

Рассмотренные примеры показывают, что единого способа интеграции современной архитектуры в историческую среду не существует.

Сравнение позволяет выделить несколько основных факторов, влияющих на качество интеграции современной архитектуры: соответствие пространственной структуре улиц, площадей и кварталов; соразмерность нового объекта окружающей застройке; влияние здания на городской силуэт и важные визуальные точки; сохранение значимых перспектив; характер взаимодействия с существующими зданиями и общественными пространствами; использование исторических мотивов без прямого копирования.

Таким образом, успешность интеграции нельзя оценивать только по степени внешнего сходства нового здания с исторической архитектурой. В одних случаях эффективным оказывается контраст, в других - продолжение существующей структуры или современная интерпретация исторических мотивов. Основное значение имеют положение нового объекта в городской системе, его масштаб, влияние на визуальные связи и характер взаимодействия с окружающим пространством.

На основании проведённого анализа можно выделить несколько основных принципов интеграции.

Новое здание должно рассматриваться как часть существующей структуры улиц, кварталов и общественных пространств. При проектировании необходимо учитывать его положение относительно улиц, направления движения, линии застройки, открытые пространства и основные визуальные оси.

При этом соответствие не означает обязательного сохранения существующей структуры без изменений. Новый объект может создавать новые связи, но они должны учитывать особенности сложившегося пространства.

Соразмерность связана с высотой, объёмом и характером нового здания относительно окружающей застройки. Она не означает обязательного равенства размеров, но предполагает понятный переход между различными масштабами. Крупный объект может быть разделён на несколько объёмов, иметь постепенное изменение высоты или более мелкое фасадное членение. Важно оценивать не только абсолютные размеры здания, но и то, как они воспринимаются относительно окружающей застройки и городского силуэта [1; 2].

Современная архитектура не обязательно должна быть похожей на историческую. Контраст может подчёркивать различие эпох и создавать выразительный архитектурный образ. Однако он должен оставаться управляемым и не разрушать основные пространственные и визуальные связи. Таким образом, значение имеет не само наличие контраста, а характер его организации. Визуальная связь нового и старого может формироваться не через копирование декора, а через общие архитектурные характеристики: пропорции, ритм фасада, вертикальные и горизонтальные членения, соотношение открытых и глухих поверхностей. Поэтому современное здание может использовать собственный архитектурный язык, сохраняя при этом связь с исторической средой через сходство принципов, а не отдельных деталей [3].

Исторический характер территории формируется не только отдельными зданиями, но и перспективами улиц, видовыми раскрытиями, силуэтом и архитектурными доминантами. Поэтому новый объект необходимо оценивать с основных точек восприятия городской среды.

Особое внимание следует уделять перспективам на ценные исторические объекты и возможности появления конкурирующих доминант. Интеграцию важно оценивать не только непосредственно рядом со зданием, но и в общей панораме территории.

Новое здание взаимодействует с исторической средой не только через внешний облик. Большое значение имеют входы, первые этажи, пешеходные маршруты, прилегающие площади и небольшие общественные пространства.

Особенно это важно для общественных и многофункциональных объектов. Их интеграция должна рассматриваться одновременно в масштабе города и в масштабе человека. Даже крупное здание может восприниматься более естественно, если его нижняя часть формирует открытое и удобное пространство для пешеходов.

Современная архитектура в исторической среде не должна обязательно создавать впечатление исторического здания. Напротив, различие между старым и новым позволяет сделать этапы развития города более читаемыми. Поэтому современный объект может иметь самостоятельный архитектурный образ, не имитируя архитектуру прошлого [2; 3]. Такой подход позволяет избежать стилизации и одновременно сохранить уважительное отношение к историческому контексту.

Выделенные принципы можно объединить в несколько взаимосвязанных уровней: пространственный, масштабный, визуальный, общественный и временной. Пространственный уровень определяет положение объекта в структуре города; масштабный – его соразмерность окружающей застройке; визуальный – характер композиции и архитектурной связи; общественный – взаимодействие с человеком и городскими пространствами; временной - различие между историческим и современным слоями.

На основании рассмотренных примеров были сформулированы основные принципы интеграции современной архитектуры в историческую среду, при этом данные принципы не следует воспринимать как набор жёстких правил. Их значение заключается в том, чтобы определить основные вопросы, которые необходимо учитывать при работе с историческим городом.

Таким образом, исходная гипотеза исследования подтверждается: современная архитектура может успешно включаться в историческую городскую среду без прямого копирования её архитектурных форм. Для этого необходимо учитывать не только внешний облик окружающей застройки, но и более глубокие характеристики места – масштаб, пространственную структуру, ритм, визуальные связи, общественные пространства и характер движения человека по городу.

Литература

1. Генералова Е.М. Концепция формирования архитектуры высотных зданий и комплексов симбиотического типа : в 2 т. : дис. ... д-ра архитектуры: 2.1.12 / Е.М. Генералова; ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет». – Самара, 2024. – 621 с.
2. Основные методы интеграции объектов современного строительства в историческую городскую среду / И.Н. Мальцева [и др.] // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2024. – № 4(63). – С. 47–54. – DOI: 10.25628/UNIIP.2024.63.4.008.
3. Плешивцев А.А. Особенности интеграции архитектурных объектов культурно-исторического наследия в структуру современной городской среды / А.А. Плешивцев, Е.А. Король, Л.С. Сабитов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 10.
4. Онищенко С.В. Методы решения проблем сохранения и развития исторических городов на примере Краснодарского края / С.В. Онищенко, Е.П. Шнурникова, А.Ю. Петриченко // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2024. – № 1(34). – С. 11–18. – EDN BYYNMV
5. A pyramid for a symbol: Cour Napoléon & Pyramid // Musée du Louvre. – URL : https://www.louvre.fr/en/explore/the-palace/a-pyramid-for-a-symbol (date of application 10.09.2026).
6. Neues Museum // Landesdenkmalamt Berlin. – URL : https://www.berlin.de/landesdenkmalamt/welterbe/museumsinsel-berlin/neues-museum-654550.php (date of application 10.09.2026).
7. James-Simon-Galerie // Stiftung Preußischer Kulturbesitz. – URL : https://www.preussischer-kulturbesitz.de/standorte/bauvorhaben/masterplan-museumsinsel/james-simon-galerie.html (date of application 11.09.2026).
8. La tour Montparnasse fête ses 50 ans! // Ville de Paris. – 15.06.2023. – URL : https://www. paris.fr/pages/la-tour-montparnasse-fete-ses-50-ans-24034 (date of application 11.09.2026).

References

1. Generalova E.M. The concept of forming the architecture of high-rise buildings and symbiotic-type complexes : in 2 vol.: dis. ... Dr. of Architecture: 2.1.12 / E.M. Generalova; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering». – Samara, 2024. – 621 p.
2. Basic methods of integrating modern construction facilities into the historical urban environment / I.N. Maltseva [et al.] // Academic Bulletin of UralNIIproekt RASN. – 2024. – № 4(63). – C. 47–54. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.63.4.008
3. Pleshivtsev A.A. Features of integration of architectural objects of cultural and historical heritage into the structure of modern urban environment / A.A. Pleshivtsev, E.A. Korol, L.S. Sabitov // Engineering Bulletin of Don. – 2023. – № 10.
4. Onishchenko S.V. Methods for Solving Problems of Preserving and Developing Historical Cities: The Case of the Krasnodar territory / S.V. Onishchenko, E.P. Shnurnikova, A.Yu. Petrichenko // Urban Planning. Infrastructure. Communications. – 2024. – № 1(34). – P. 11–18. EDN BYYNMV
5. A pyramid for a symbol: Cour Napoléon & Pyramid // Musée du Louvre. – URL : https://www.louvre.fr/en/explore/the-palace/a-pyramid-for-a-symbol (date of application 10.09.2026).
6. Neues Museum // Landesdenkmalamt Berlin. – URL : https://www.berlin.de/landesdenkmalamt/welterbe/museumsinsel-berlin/neues-museum-654550.php (date of application 10.09.2026).
7. James-Simon-Galerie // Stiftung Preußischer Kulturbesitz. – URL : https://www.preussischer-kulturbesitz.de/standorte/bauvorhaben/masterplan-museumsinsel/james-simon-galerie.html (date of application 11.09.2026).
8. La tour Montparnasse fête ses 50 ans! // Ville de Paris. – 15.06.2023. – URL : https://www. paris.fr/pages/la-tour-montparnasse-fete-ses-50-ans-24034 (date of application 11.09.2026).

УДК 691.3

ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОПРЕССОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ЧЕРЕЗ ОПТИМИЗАЦИЮ ГРАНУЛОМЕТРИИ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

♦♦♦♦♦

ENHANCING THE PHYSICOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF VIBROPRESSED PRODUCTS THROUGH FINE AGGREGATE GRADATION OPTIMIZATION

Яханов В.А.
аспирант,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
yahanov98@mail.ru

Далецкий А.П.
кандидат технических наук,
доцент,
Уфимский государственный нефтяной
технический университет

Yakhanov V.A.
Postgraduate Student,
Ufa State Petroleum
Technological University
yahanov98@mail.ru

Daletsky A.P.
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Ufa State Petroleum
Technological University

Аннотация. В данной статье исследовано влияние гранулометрического состава песка на характеристики двухслойных вибропрессованных бетонов. Предложена технология внутризаводского фракционирования инертных материалов Башкортостана на струнных грохотах. Установлено, что песок с Мкр = 3,0 оптимизирует прочность базового слоя, а песок с Мкр = 2,33 обеспечивает нормируемую прочность и эстетичный внешний вид лицевого слоя.

Ключевые слова: вибропрессование, мелкий заполнитель, фракционирование, модуль крупности, качество поверхности.

Annotation. This article examines the influence of the granulometric composition of sand on the characteristics of two-layer vibration-pressed concrete. A technology for in-plant fractionation of inert materials from Bashkortostan using string screens is proposed. It has been established that sand with Мкр = 3.0 optimizes the strength of the base layer, while sand with Мкр = 2.33 ensures the нормируемой strength and an aesthetic appearance of the face layer..

Keywords: vibropress technology, fine aggregate, screening, fineness modulus, surface quality.

Промышленность строительных материалов Республики Башкортостан опирается на местную минерально-сырьевую базу. Помимо традиционных скальных пород, в производство активно вовлекаются природные пески и техногенное сырье – продукты обогащения промышленных отходов. Опредяляющим фактором при подборе бетонов является модуль крупности заполнителя. С его увеличением снижается объём воды, необходимый для затворения, и уменьшается расход цемента [1]. Однако мелкие пески хуже поддаются уплотнению, из-за чего их использование чаще ограничено растворными смесями.

Из-за изменчивости геологического строения карьеров региона качество поступающего сырья нестабильно. Чтобы гарантировать стабильность параметров готовой продукции, в технологическую линию интегрирован комплекс фракционирования [2]. Последовательное просеивание на ситах и струнных грохотах разделяет инертные на узкие фракции. Такой подход позволяет точно настраивать зерновой состав заполнителя независимо от нестабильности карьерного сырья.

Актуальным трендом в производстве дорожно-строительных изделий становится изготовление двухслойных элементов. Базовый слой берет на себя основные механические нагрузки, а верхний обеспечивает износостойкость и эстетику.

Качество декоративного слоя напрямую зависит от применения фракционированного песка 0–5 мм. Высокая однородность мелкого заполнителя обеспечивает предельно плотную укладку частиц в матрице, что уменьшает пористость, предотвращает появление микротрещин и увеличивает срок службы композита [3].

Экспериментальная часть работы выполненная по ГОСТ 8735-88, включает анализ образцов песчано-гравийной смеси (ПГС). Сравнивались исходные природные пробы и материал, прошедший классификацию на ситах 5–8 мм и струнном грохоте. Данные по гранулометрии исходного ПГС представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения зернового состава до просеивания

Размеры сита, мм	Частные остатки, %	Полные остатки, %
40	2,83	2,83
30	0	0
25	1,17	4
20	3	10,37
15	3,33	13,5
12,5	3,17	17,83
10	4,33	17,83
7,5	6,5	24,33
5	9,5	33,83
2,5	11,7	45,53
1,25	9,5	55,03
0,63	11,17	66,2
0,315	26,5	92,7
0,16	6,5	99,2
Проход	0,8	100

В соответствии с классификацией по гранулометрическому составу, изучаемый песок характеризуется модулем крупности Мкр = 3,00 и относится к группе крупных песков. Гранулометрические характеристики заполнителя, прошедшего рассев на грохоте с размерным диапазоном ячеек 5–8 мм, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения зернового состава после сита с ячейками 5–8 мм

Наименование остатков	Размеры сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Проход через 0,16
Частные, %	9,70	14,60	23,30	46,00	5,70	0,7
Полные, %	9,70	24,30	47,60	93,60	99,3	100,0

На основе классификации по гранулометрическому составу исследуемый заполнитель с модулем крупности Мкр = 2,75 идентифицирован как крупный песок. В таблице 3 приведены результаты ситового анализа сырья, прошедшего сепарацию на струнном грохоте с межструнным зазором менее 7 мм.

Таблица 3 – Результаты определения зернового состава после струйного сита

Наименование остатков	Размеры сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Проход через 0,16
Частные, %	1,50	7,40	22,90	59,60	7,90	0,7
Полные, %	1,50	8,90	31,80	91,40	99,3	100,0

В соответствии с классификацией по гранулометрическому составу, исследуемый заполнитель с модулем крупности Мкр = 2,33 квалифицируется как средний песок. Для верификации оптимальных параметров зернового состава была реализована программа контрольных испытаний. Оценка качества образцов базового слоя выполнялась по пределу прочности при сжатии, тогда как для декоративно-защитного лицевого слоя дополнительно определялась истираемость [4]. Такой дифференцированный подход обеспечивает синергетический эффект – высокую несущую способность конструктивного основания и повышенную износостойкость поверхностного слоя. Составы экспериментальных смесей систематизированы в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные для проведения испытаний

Номер состава	Модуль крупности песка, мм
1	3,00
2	2,75
3	2,33

Ниже представлены результаты испытаний на прочность для основного слоя (табл. 5), а также результаты испытаний на прочность (табл. 6) и истираемость (табл. 7) для облицовочного слоя.

Таблица 5 – Результаты испытаний образцов основного слоя на прочность

Номер состава	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте	
	7 суток	28 суток
1	43,1	46
2	42,8	45,5
3	42,2	44,8

Таблица 6 – Результаты испытаний образцов лицевого слоя на прочность

Номер состава	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте	
	7 суток	28 суток
1	40,1	43,6
2	36,9	40,4
3	35,6	39,8

Таблица 7 – Результаты испытаний на истираемость лицевого слоя

Номер состава	Масса образца до испытания, г	Масса образца после четырёх циклов испытания, г	Площадь истираемой грани образца, см	Истираемость, г/см^2
1	564	525	49,98	0,72
2	570	532	49,98	0,76
3	566	530	49,98	0,78

Экспериментально доказано, что крупный песок (Мкр = 3,00) является оптимальным сырьем для базового слоя, обеспечивающим предельные значения механической прочности бетона. Применение данной фракции в лицевом слое ограниченно из-за образования высокой шероховатости фактуры. Напротив, заполнитель с Мкр = 2,33 позволяет получить гладкую, эстетически привлекательную поверхностную структуру, сохраняя прочность на уровне проектного класса В30, что соответствует нормам для дорожно-строительных изделий.

Практическая реализация многоступенчатой системы подготовки песка подтвердила целесообразность фракционирования сырья на предприятии. Точная калибровка процессов просеивания дает возможность вовлекать в технологический цикл локальные месторождения, минимизировать зависимость от сторонних поставщиков, сократить себестоимость и гарантировать стабильность качества серийной продукции.

Установленное влияние зернового состава на качество поверхности лицевого слоя способствует не только расширению линейки декоративных изделий, но и продлению межремонтного ресурса формообразующей оснастки (в частности, пуансонов) за счет уменьшения абразивных нагрузок. Данные результаты особенно актуальны при выпуске двухслойных изделий с пигментированным слоем (системы «Колор-микс»), где яркость и цветопередача напрямую зависят от однородности и плотности матрицы микрорельефа.

Литература

1. Юрьев В.В. Совершенствование технологии производства двухслойной тротуарной плитки методом полусухого вибропрессования / В.В. Юрьев, С.А. Резван // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2021. – № 3(84). – С. 105–112.
2. Ефименко Ю.С. Особенности подбора составов бетона для двухслойных элементов мощения / Ю.С. Ефименко, Л.И. Касторных // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 4(81). – С. 112–118.
3. Сватовская Л.Б. Влияние гранулометрии заполнителя на плотность и износостойкость декоративных бетонов / Л.Б. Сватовская, Т.В. Макарова // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 5(88). – С. 134–139.
4. Лотов В.А. Влияние комплексных химических добавок на структуру и свойства жестких бетонных смесей для дорожных // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 2(91). – С. 105–112.

References

1. Yuryev V.V. Improvement of the production technology for two-layer paving tiles using the semi-dry vibropressing method / V.V. Yuryev, S.A. Rezvan // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. – 2021. – № 3(84). – P. 105–112.
2. Efimenko Yu.S. Specifics of selecting concrete mix designs for two-layer paving elements / Yu.S. Efimenko, L.I. Kastornykh // Bulletin of Civil Engineers. – 2020. – № 4(81). – P. 112–118.
3. Svatovskaya L.B. Influence of aggregate particle-size distribution on the density and wear resistance of decorative concretes / L.B. Svatovskaya, T.V. Makarova // Bulletin of Civil Engineers. – 2021. – № 5(88). – P. 134–139.
4. Lotov V.A. Influence of complex chemical admixtures on the structure and properties of stiff concrete mixes for road construction // Bulletin of Civil Engineers. – 2022. – № 2(91). – P. 105–112.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ БЕТОНЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Материалы IV Международной
научно-практической конференции
(24 сентября 2026 г.)

Статьи публикуются в авторской редакции

Технический редактор – О.Я. Фоменко
Компьютерная верстка – М.Н. Гусева
Дизайн обложки – М.Б. Жаренко

Подписано в печать 25.09.2026
Бумага офсетная
Печ. л. 20,63
Усл. печ. л. 19,18
Уч.-изд. л. 17,26

Формат 60×84 $^{1}/_{8}$
Печать трафаретная
Изд. № 1468
Тираж 100 экз.
Заказ № 2708

ООО «Издательский Дом – Юг»
350010, г. Краснодар, ул. Зиповская 9, литер «Г», оф. 41/3
тел. +7(918) 41-50-571

e-mail: id-yug@id-yug.com Сайт: https://id-yug.co