УДК 697.95

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ РЕКУПЕРАЦИИ

♦♦♦♦♦

# PROSPECTS FOR THE USE OF NEW GENERATION THERMOELECTRIC MODULES IN HEAT RECOVERY SYSTEMS

**Беликова Надежда Борисовна**
старший преподаватель,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
Ageevv@mail.ru

**Кирмач Муарем Рустемович**
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
muarem_k@mail.ru

**Бадмаев Семён Игоревич**
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
semoyn.badmaev.2002@gmail.com

**Баширина Наталья Сергеевна**
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский технический университет
volkova261279@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье исследуется, как система приточно-вытяжной вентиляции с функцией рекуперации тепла влияет на состояние строительных конструкций в течение всего года, в частности, на их тепловые и влажностные характеристики. Результаты показывают, что рекуперация тепла не только обеспечивает значительную экономию энергии, но и продлевает долговечность строительных материалов, снижая температурные деформации и предотвращая скопление влаги. Для обеспечения независимого питания дополнительных функций рекуператоров, авторы предлагают инновационное решение: термоэлектрические модули с уникальной ориентацией сторон. Эти модули способны генерировать энергию при более низком перепаде температур (40 °С против 70 °С у традиционных), демонстрируя при этом стабильную работу под нагрузкой. Это открывает путь к разработке полностью автономных вентиляционных систем.

**Ключевые слова:** рекуперация тепла, ограждающие конструкции, влажностный режим, термоэлектрический генератор, энергоэффективность, конденсация влаги.

**Belikova Nadezhda Borisovna**
Senior Lecturer,
Irkutsk National Research Technical University
Ageevv@mail.ru

**Kirmach Muarem Rustemovich**
Master's Student,
Irkutsk National Research Technical University
muarem_k@mail.ru

**Badmaev Semyon Igorevich**
Master's Student,
Irkutsk National Research Technical University
semoyn.badmaev.2002@gmail.com

**Bashirina Natalya Sergeevna**
Master's Student,
Irkutsk National Research Technical University
volkova261279@mail.ru

**Annotation**. This article examines how a supply and exhaust ventilation system with heat recovery impacts building structures year-round, specifically their thermal and humidity characteristics. The results demonstrate that heat recovery not only provides significant energy savings but also extends the life of building materials by reducing thermal deformations and preventing moisture accumulation. To independently power the additional functions of the heat recovery systems, the authors propose an innovative solution: thermoelectric modules with a unique side orientation. These modules are capable of generating energy at a lower temperature difference (40 °C versus 70 °C for traditional modules), while demonstrating stable operation under load. This paves the way for the development of fully autonomous ventilation systems.

**Keywords:** heat recovery, enclosing structures, humidity control, thermoelectric generator, energy efficiency, moisture condensation.

Воздухообмен, являющийся неотъемлемым атрибутом современных систем общеобменной вентиляции, оказывает существенное влияние на теплофизическое и влажностное состояние ограждающих конструкций (ОК) на протяжении всего года. Понимание механизмов этого влияния критически важно для проектирования долговечных, энергоэффективных и безопасных зданий. Ключевым элементом, обеспечивающим баланс между необходимым воздухообменом и энергопотреблением, яв-

ляются приточно-вытяжные установки с рекуперацией тепла (рекуператоры). Кроме снижения теплопотерь с вентиляционным воздухом, данные системы оказывают комплексное воздействие на температурно-влажностное поле ОК. Авторами выполнен сезонный анализ этого воздействия и предлагается способ повышения автономности рекуператоров за счет интеграции термоэлектрических генераторов нового типа, использующих сбросное тепло для выработки электроэнергии.

Воздухообмен, особенно принудительный, изменяет влажностный режим, усиливает конвективный теплообмен и создает перепады давления, влияющие на инфильтрационные потоки через неплотность.

В летнее время, характеризующееся высокими наружными температурами и влажностью, основную опасность представляет работа систем кондиционирования в сочетании с неконтролируемым притоком наружного воздуха. При наличии неплотностей в ОК влажный наружный воздух может проникать внутрь многослойных конструкций. Контактируя с охлажденными изнутри слоями (например, утеплителем), он достигает точки росы, что приводит к внутренней конденсации. Результатом становится увлажнение теплоизоляции, снижение ее термического сопротивления и развитие биоповреждений. Использование рекуператора, особенно с энтальпийным теплообменником, позволяет частично осушать приточный воздух, снижая риск как поверхностной, так и внутренней конденсации, а также уменьшая температурные деформации материалов за счет снижения тепловой нагрузки [1].

Переходные сезоны отличаются нестабильностью погодных условий и переменной влажностью. В это время рекуператор выступает в роли стабилизатора микроклимата. Эффективная утилизация тепла (или холода) из вытяжного воздуха позволяет поддерживать стабильную температуру в помещении, снижая термические напряжения в ОК. Энтальпийная рекуперация обеспечивает гибкое управление влажностью: при высокой наружной влажности приточный воздух осушается, предотвращая конденсацию на холодных поверхностях; при низкой – увлажняется, что исключает пересыхание и растрескивание отделочных материалов (дерева, штукатурки). Регулярный воздухообмен ликвидирует застойные зоны, где обычно формируются очаги плесени.

Зимой влияние рекуператора на состояние ОК становится наиболее значимым. Основная угроза связана с накоплением влаги, выделяемой при жизнедеятельности человека, внутри ограждающих конструкций. При отсутствии эффективной вентиляции теплый влажный воздух помещения диффундирует в холодные слои утеплителя, где конденсируется. Это приводит к целому ряду негативных последствий: увлажнение утеплителя и рост теплопотерь, коррозия металлических элементов, гниение деревянных конструкций, разрушение материалов при циклическом замораживании / оттаивании, развитие плесени. Рекуператор, удаляя избыточную влагу из помещения, кардинально снижает риск внутренней конденсации. Кроме того, возврат тепла из вытяжного воздуха позволяет поддерживать высокую температуру внутренних поверхностей, что уменьшает разницу температур на границе «помещение-ОК» и предотвращает образование конденсата на откосах и в углах [2].

Для реализации дополнительных функций (увлажнение/осушение, подогрев приточного воздуха, защита от обмерзания) и обеспечения работы автоматики рекуператорам требуется электроэнергия. Анализ существующих решений, в частности установок типа TURKOV, показывает, что в их конструкции отсутствуют встроенные источники питания для этих целей. Перспективным направлением является использование термоэлектрических генераторов (ТЭГ), преобразующих тепловой поток, рассеиваемый в воздуховодах, в электрическую энергию. Однако классические ТЭГ требуют высокого температурного градиента ($\Delta T$), который не всегда достижим в штатных режимах работы вентиляции [3].

Для преодоления указанного ограничения была предложена конструкция термоэлектрического модуля с измененной пространственной ориентацией зон теплообмена (патент РФ № 2663748) [4]. В отличие от классического модуля, представляющего собой объемную фигуру с двумя малыми параллельными плоскостями, разделенными

столбиками полупроводников (расстояние 1–3 мм), новая технология основана на плоскостном исполнении с использованием сеткотрафаретной печати. Суть метода заключается в формировании полупроводниковых дорожек n- и p-типа на диэлектрической подложке. Технология позволяет варьировать геометрию, размеры и пространственную ориентацию частей модуля, а также увеличивать площадь тепловоспринимающей поверхности относительно тепловыделяющей. Такой подход дает возможность эффективно собирать тепло с больших поверхностей воздуховодов при сохранении необходимого для генерации градиента температуры.

Для верификации предложенного решения были изготовлены два образца термоэлектрических модулей с одинаковым количеством спаев (400) на основе теллурида висмута. Первый образец имел классическую конструкцию, второй – с пространственной ориентацией и увеличенной в два раза площадью теплопоглощающей стороны.

Эксперименты показали:

1. Классический модуль демонстрировал устойчивую работу при $\Delta T = 70$ °C. При увеличении токовой нагрузки с 2А до 5А наблюдалось «проседание» напряжения, что ограничивает его применение.

2. Модуль с пространственной ориентацией показал стабильную работу уже при $\Delta T = 40$ °C. Проседания напряжения при увеличении нагрузки зафиксировано не было, что свидетельствует о более высокой эффективности и устойчивости.

Далее к системе был подключен преобразователь напряжения, аккумулятор и нагревательный элемент мощностью 25 Вт. В течение четырех месяцев эксплуатации деградационных изменений в работе термоэлектрических модулей и вентиляционной системы выявлено не было.

Экспериментально подтверждено, что тепловая энергия, ранее рассеивавшаяся в окружающую среду с участка воздуховода, может быть преобразована в электрическую, достаточную для питания полезной нагрузки.

Полученные результаты имеют важное прикладное значение. Использование модуля с пространственной ориентацией позволяет эффективно утилизировать низкопотенциальное тепло вентиляционных выбросов, которое ранее не рассматривалось как энергетический ресурс. В проведенном эксперименте была задействована лишь одна сторона прямоугольного воздуховода сечением 100 × 100 мм$^2$ длиной 100 мм. При этом не использовались дополнительные устройства охлаждения или нагрева. С учетом этих факторов потенциал генерации может быть увеличен как минимум в четыре раза. Более того, конструктивные особенности существующих рекуператоров (например, TURKOV) и конфигурация воздуховодов позволяют увеличить площадь теплообмена в 20–30 раз без внесения существенных изменений в конструкцию. Это открывает возможность создания полностью или частично автономных рекуперационных систем, в которых выработка электроэнергии для управления и дополнительных функций осуществляется за счет утилизации собственных тепловых потерь.

**Выводы**

1. Контролируемый воздухообмен через рекуператоры оказывает определяющее влияние на долговечность ограждающих конструкций. Стабилизация температуры и влажности внутри помещения предотвращает внутреннюю конденсацию, снижает термические напряжения и исключает условия для биоповреждений, что особенно критично в зимний и летний периоды.

2. Применение термоэлектрических модулей нового типа с пространственной ориентацией зон теплообмена позволяет эффективно преобразовывать низкопотенциальное тепло вентиляционных выбросов в электрическую энергию. Экспериментально подтверждена их более высокая эффективность (работа при $\Delta T = 40$ °C против 70 °C для классических аналогов) и стабильность выходных характеристик под нагрузкой.

3. Интеграция разработанных термоэлектрических генераторов в системы приточно-вытяжной вентиляции создает предпосылки для создания автономных рекуперационных установок, способных обеспечивать энергией собственные цепи управления и дополнительные функциональные узлы без привлечения внешних источников питания.

### Литература

1. Аксенов А.К. Описание процессов в энтальпийных мембранных теплообменниках систем вентиляции на основе законов тепломассопереноса / А.К. Аксенов, М.С. Самоделова // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 10(112). – С. 8–14. EDN ERUVQV
2. Самарин О.Д. Обоснование применения энтальпийных утилизаторов в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / О.Д. Самарин, М.С. Аншакова // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2019. – № 4(208). – С. 54–57. EDN RHGPGK
3. Оптимизация работы вентиляционных систем на предприятиях общественного питания с помощью программируемых устройств и инфракрасных нагревательных элементов / И.Ю. Шелехов [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2025. – № 1(153). – С. 38–45. EDN PMVLIP
4. Возобновляемые источники энергии: новые возможности использования термоэлектрических генераторов / И.Ю. Шелехов [и др.] // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2020. – Т. 10. – № 3(34). – С. 442–451. DOI 10.21285/2227-2917-2020-3-442-451. EDN SGWXOL

### References

1. Aksyonov A.K. Description of processes in enthalpy membrane heat exchangers of ventilation systems based on the laws of heat and mass transfer / A.K. Aksyonov, M.S. Samodelova // Components of Scientific and Technological Progress. – 2025. – № 10(112). – P. 8–14. EDN ERUVQV
2. Samarin O.D. Justification for the use of enthalpy heat exchangers in ventilation and air conditioning systems / O.D. Samarin, M.S. Anshakova // Plumbing, Heating, Air Conditioning. – 2019. – № 4(208). – P. 54–57. EDN RHGPGK
3. Optimization of ventilation systems at public catering establishments using programmable devices and infrared heating elements / I.Yu. Shelekhov [et al.] // Energy saving and water treatment. – 2025. – № 1(153). – P. 38–45. EDN PMVLIP
4. Renewable energy sources: new possibilities of using thermoelectric generators / I.Yu. Shelekhov [et al.] // News of universities. Investments. Construction. Real estate. – 2020. – Vol. 10. – № 3 (34). – P. 442–451. DOI 10.21285/2227-2917-2020-3-442-451 EDN SGWXOL