УДК 620.179.1

АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ОТКАЗА

ANALYSIS OF NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS TO ENSURE RELIABILITY AND DURABILITY OF COMPLEX SYSTEMS WITH A HIGH DEGREE OF FAILURE

Стефанов Роман Евгеньевич
АО «Газпром газораспределение Тамбов»
r.stefanov@internet

Аннотация. Проблема обеспечения максимально возможного срока службы и «замедления» старения систем с высокой степенью отказа, а также продления их сроков эксплуатации в условиях жёстко ограниченных средств (финансовых возможностей, технических, человеческих ресурсов и др.) является одной из актуальных проблем для учёных, экономистов и технических специалистов разных стран. Последствия возникновения отказов, неисправностей или дефектов в таких системах могут приводить к последствиям вплоть до трагических: глобальным катастрофам, поражению окружающей среды, человеческим жертвам, большим финансовым и материальным потерям. Категоричность требований общественности о необходимости исключения техногенных катастроф, которые происходят с частотой 600–700 в год с ущербом для окружающей среды, делает проблему безопасности систем ещё более актуальной.

Ключевые слова: мониторинг технического состояния сложных систем; методы неразрушающего контроля; выбор метода неразрушающего контроля; чувствительность методов неразрушающего контроля; комплексное применение методов неразрушающего контроля; оптимальное распределение объёмов контроля на всех этапах жизненного цикла объекта; планирование технического обслуживания системы с учётом экономических показателей.

Stefanov Roman Evgenievich
JSC «Gazprom Gas Distribution Tambov»
r.stefanov@internet

Annotation. The problem of ensuring the maximum possible service life and «slowing down» the aging of systems with a high failure rate, as well as extending their service life under conditions of strictly limited resources (financial capabilities, technical, human resources, etc.) is one of the pressing problems for scientists, economists and technical specialists in different countries. The consequences of failures, malfunctions or defects in such systems can lead to consequences up to and including tragic ones: global catastrophes, damage to the environment, human casualties, large financial and material losses. The categorical nature of public demands for the need to eliminate man-made disasters, which occur with a frequency of 600–700 per year with damage to the environment, makes the problem of system safety even more pressing.

Keywords: monitoring the technical condition of complex systems; non-destructive testing methods; selection of a non-destructive testing method; sensitivity of non-destructive testing methods; comprehensive application of non-destructive testing methods; optimal distribution of testing volumes at all stages of the object's life cycle; planning of system maintenance taking into account economic indicators.

Проблемы выявления дефектов и характеристики методов неразрушающего контроля

При проведении мониторинга технического состояния сложных систем и агрегатов одной из наиболее актуальных является задача объективного своевременного обнаружения дефектов различной природы и организация контроля за развитием дефектов из-за старения элементов при эксплуатации.

Одним из путей предотвращения нежелательных последствий от эксплуатации изделий с дефектами является систематичное использование методов неразрушающего контроля. Дефектом, согласно нормативно-технической документации (ГОСТ 17-102), называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям. Однако в практике применения средств неразрушающего контроля нет полного соответствия понятия «дефект» определению по ГОСТ. Обычно под дефектом понимают отклонение параметра от требований проектно-конструкторской документации, выявленное средствами неразрушающего контроля. Связь такого понятия с определением по ГОСТ устанавливается путём разделения дефектов на допустимые требованиям нормативно-технической документации и недопустимые.

Обобщая, здесь и далее под дефектом будем понимать физическое проявление изменения характеристик объекта контроля с параметрами, превышающими нормативные требования. По происхождению дефекты подразделяют на производственно-технологические, возникающие в процессе проектирования и изготовления изделия, его монтажа и установки, и эксплуатационные, возникающие после некоторой наработки изделия в результате процессов деградации, а также в результате неправильной эксплуатации и ремонтов.

В дальнейшем, говоря о дефектах, выявляемых средствами и методами неразрушающего контроля, будем иметь в виду эксплуатационные и производственно-технологические дефекты, не выявленные при изготовлении и сдаче систем в эксплуатацию.

Так, например, в зависимости от объекта вся совокупность объектов и систем может быть разбита на группы, для которых характерны однотипные дефекты:

1) *силовые металлоконструкции* (стрелы грузоподъёмных машин, установщиков, несущие форменные конструкции, силовые элементы агрегатов обслуживания) – для них характерны литейные дефекты (рыхлота, пористость, ликвационные зоны, дендритная ликвация, зональная ликвация, подусадочная ликвация, газовые пузыри или раковины, песчаные и шлаковые раковины), металлические и неметаллические включения (утяжины, плены, спаи, горячие, холодные и термические трещины); дефекты прокатанного и кованого металла (трещины, флокены, волосовины, расслоения, внутренние разрывы, рванины, закаты и заковы, плены); дефекты сварных соединений (трещины в наплавленном металле, холодные трещины, микротрещины в шве, надрывы, трещины, образующиеся при термообработке, рихтовочные трещины, непровары, поры и раковины, шлаковые включения); дефекты, возникающие при обработке деталей (закалочные и шлифовочные трещины, надрывы); дефекты, возникающие при эксплуатации изделий (усталостные трещины, коррозионные повреждения, трещины, образующиеся в результате однократно приложенных высоких механических напряжений, механические повреждения поверхности);

2) *сосуды, теплообменные аппараты, трубопроводы* (сосуды и ёмкости, влагомаслоотделители и холодильники компрессорных установок, теплообменные аппараты, камеры нейтрализации, магистрали газов и жидкостей и др.) – для них характерны производственно-технологические и эксплуатационные дефекты, аналогично силовым металлоконструкциям. Помимо этого для данной группы оборудования характерны негерметичности соединений, приводящие к утечкам рабочих сред, уменьшению проходных сечений в результате отложений на стенках продуктов коррозии и накипи. Важнейшим параметром, определяющим долговечность и надёжность эксплуатации нефтегазовых труб различных диаметров, является толщина антикоррозийного трёхслойного полиэтиленового покрытия;

3) *механизмы и машинное оборудование* (гидроприводы, редукторы, насосы, компрессоры, вентиляторы и приводные электродвигатели, дизельные электростанции) – для них характерны износ и поломка деталей, повреждение уплотнений, сопровождающиеся утечкой рабочих жидкостей, местным аномальным нагревом частей оборудования, посторонним шумом, повышенной вибрацией;

4) трубопроводы, корпуса систем под давлением, парогенераторы, системы жидкостного охлаждения – для них характерны дефекты сварных соединений (отклонение размеров шва от требований нормативных документов, непровары, смещение стыкуемых кромок, несплавления, подрезы, сквозные свищи); коррозионный износ (особую опасность представляет локальная неоднородная коррозия, которая может образовываться в результате механических повреждений изоляционного покрытия и попадания влаги в пространство между трубопроводом и защитным покрытием); трещины и разрывы (причины образования: пороки в металле, дефекты и неправильная термообработка стыков, неправильное гнутьё и монтаж, а также гидравлические удары);

5) контрольно-измерительные приборы и автоматика, оборудование систем управления – для них характерны выход из строя отдельных блоков и приборов, нарушение электрического контакта, уменьшение сопротивления и пробой изоляции;

6) кабельное оборудование (силовые кабели, измерительные кабели, кабели систем управления, кабели связи) – для него характерны уменьшение сопротивления изоляции, старение изоляции, обрыв жил кабеля, возгорание изоляции и др.;

7) электронное оборудование – для него характерен выход из строя блоков и отдельных элементов;

8) оборудование электроснабжения (трансформаторы, коммутационная аппаратура) – для него характерны залипания контактов, выход из строя концевых выключателей и приводов межсекционных выключателей;

9) объекты, содержащие радиоактивные вещества, активность которых определяется без разрушения исходных матриц – под дефектами можно понимать уровни активности, превышающие допустимые нормы;

10) конструкции строительных сооружений – для них характерны такие дефекты, как трещины, раковины, несплошности бетона, дефекты армирования бетона, разрушение фундаментов и оснований и т.д.

Таким образом, для каждой из групп оборудования можно составить перечень методов неразрушающего контроля и перечень приборов и технологий их применения для реализации этих методов.

Выбор метода неразрушающего контроля должен быть основан, помимо априорного знания о характере дефекта, на таких факторах, как:

- условия работы изделия;
- форма и размеры изделия;
- физические свойства материала деталей изделия;
- условия контроля и наличие подходов к проверяемому объекту;
- технические условия на изделия, содержащие количественные критерии недопустимости дефектов и зачастую нормирующие применение методов контроля на конкретном изделии;
- чувствительность методов.

Достоверность результатов определяется чувствительностью методов неразрушающего контроля, выявляемостью и повторяемостью результатов и основана на тщательной калибровке.

Чувствительность метода контроля является важной его характеристикой. В таблице 1 приведена чувствительность для различных методов определения несплошностей в материале изделий.

Таблица 1 – Чувствительность методов неразрушающего контроля при определении несплошностей в металле

Метод	Минимальные размеры выявляемых несплошностей, мкм		
	ширина раскрытия	глубина	протяжённость
Визуально-оптический	5–100	–	100
Цветной	1–2	10–30	100–300
Люминесцентный	1–2	10–30	100–300
Магнитопорошковый	1	10–50	30
Вихретоковый	0,5–1	150–200	600–2000
Ультразвуковой	1–30	–	–
Радиографический	100	2-3 % толщины изделия	–

Применение каждого из методов в каждом конкретном случае характеризуется вероятностью выявления дефектов. На вероятность выявления дефектов влияют чувствительность метода, а также условия проведения процедуры контроля. Определение вероятности выявления дефектов является достаточно сложной задачей, которая ещё более усложняется, если для повышения достоверности определения дефектов приходится комбинировать методы контроля. Комбинирование методов подразумевает не только использование нескольких методов, но и чередование их в определённой последовательности (технологии). Вместе с тем, стоимость применения метода контроля или их совокупности должна быть по возможности ниже. Таким образом, выбор стратегии применения методов контроля основывается на стремлении, с одной стороны, повысить вероятность выявления дефектов и, с другой стороны, снизить различные технико-экономические затраты на проведение контроля. В качестве примера вероятность обнаружения дефектов в сварных соединениях приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Относительная выявляемость дефектов сварки различными методами дефектоскопии в % от общего числа дефектов

Метод контроля	Поверхностные трещины	Неметаллические включения	Раковины	Непровары	
				по скосам	в корне шва
Просвечивание рентгеновское	2	100	100	65	65
Просвечивание гамма-лучами	0	85	90	28	30
Ультразвуковой	10	45	85	95	45
Магнитопорошковый	98	0	0	0	0
Капиллярный (цветной)	100	0	0	0	0

К примеру, на АЭС в России используют нормы дефектов для изготовления. Поэтому объёмы ремонта на АЭС в 10 раз и более превышают необходимый уровень для обеспечения безопасной эксплуатации. Введение на действующих АЭС экономически обоснованных и оптимальных норм дефектов позволит сократить в 10 и более раз трудозатраты и рационально перераспределить средства для повышения безопасности и продления остаточного ресурса.

Однако, несмотря на значительные успехи в развитии методов неразрушающего контроля и применяемые меры по контролю технического состояния различных систем, отдельные дефекты остаются не выявленными и становятся причинами и результатами аварийных ситуаций и больших катастроф. Так, методы и средства неразрушающего контроля, применяемые на стадиях производства и предэксплуатационного контроля на АЭС, далеки от совершенства и в результате их применения не выявляется значительное число дефектов технологической природы.

Эффективность комплексного применения методов неразрушающего контроля

Объективный анализ применения различных методов привёл к целесообразности применения комплексных систем контроля, которые используют разные по физической природе методы исследо-

вания, что, в свою очередь, позволит исключить недостатки одного метода, взаимодополнить методы и реализовать тем самым принцип «избыточности» для повышения надёжности контроля систем и агрегатов.

Различные методы неразрушающего контроля характеризуются разными значениями технико-экономических параметров: чувствительностью, условиями применения, типами контролируемых объектов и т.д. Поэтому при формировании комплекса методов неразрушающего контроля разной физической природы возникает проблема оптимизации состава комплекса с учётом критериев их эффективности и затрат ресурсов.

Комплексное использование наиболее чувствительных методов не означает, что показатели достоверности будут соответственно наибольшими, а в свою очередь, учёт первоочерёдности технических показателей может привести к противоречиям с экономическими критериями, такими как трудозатраты, стоимость, время контроля и т.д., что, в свою очередь, может привести к тому, что выбранный комплекс методов неразрушающего контроля может оказаться с экономической точки зрения неэффективным.

Для реализации различных методов неразрушающего контроля разработаны различные приборы: дефектоскопы, толщиномеры, тепловизоры для разных дефектов (трещин, негерметичностей), электронное оборудование (для нахождения ослабления электрических контактов), механическое оборудование, которое имеет различные технико-экономические характеристики и технологии использования для различных типов дефектов и др.

Из анализа имеющихся характеристик вытекает необходимость решения задачи выбора состава (комплекса) методов неразрушающего контроля как задачи в оптимизационной постановке.

Комплексное применение методов неразрушающего контроля для диагностики и обнаружения дефектов в агрегатах и системах направлено на обеспечение увеличения эффективности и достоверности контроля, продления работоспособности и ресурса.

Задача формирования комплекса различных методов неразрушающего контроля для обнаружения совокупности возможных (наиболее опасных дефектов) в системе может быть сформулирована как оптимизационная многоуровневая однокритериальная (многокритериальная) задача дискретного программирования. Решение задачи – оптимальное сочетание различных методов неразрушающего контроля, применение которых наиболее эффективно при эксплуатации и анализе ресурса дорогостоящих систем.

Актуальными при проведении неразрушающего контроля являются также задачи оптимального распределения объёмов контроля на всех этапах жизненного цикла объекта, оптимизации мест и параметров контроля, планирования технического обслуживания системы с учётом экономических показателей.

Индустриализация применения методов неразрушающего контроля

Совершенствование опыта в области системного анализа, развитие научно-методической базы и накопление статистической информации позволили подойти к формулировке и обоснованию концепции «абсолютной надёжности» ответственных систем, которая базируется на результатах использования вероятностных методов анализа безопасности и прочности, анализа критичности и оптимального резервирования, совершенствования и широкого применения методов неразрушающего контроля, автоматизированных систем неразрушающего контроля, количественного учёта влияния неразрушающего контроля на прочность и долговечность систем, компьютерном анализе и оценке результатов расчётов и измерений.

Большие объёмы проведения работ по выявлению дефектов в системах и катастрофические последствия, которые могут быть причиной некачественного его проведения, ставят задачу по индустриализации применения методов неразрушающего контроля с использованием математических моделей, методов и современных информационных технологий для организации мониторинга при эксплуатации систем.

Индустриализация применения методов неразрушающего контроля и организации работ на ответственных объектах и системах требуют больших материальных и временных затрат, сравнимых со всеми остальными расходами на эксплуатацию объекта.

При проведении мониторинга, исследования систем (элементов) и применения методов неразрушающего контроля с целью продления ресурса важными являются данные, получаемые в результате решения задач:

- прогнозирования вероятности безотказной работы элементов и систем. Прогнозирование может осуществляться раздельно по постепенным и внезапным отказам, с использованием моделей полиномиальной регрессии, моделей анализа цензурированных выборок;
- составление (или использование готовой) обобщённой структурной схемы надёжности системы и её узлов и элементов. Обобщённая структурная схема надёжности может содержать помимо основных и резервных элементов, элементы из состава ЗИП (запасные части, инструменты и принадлежности). Структурная схема надёжности представляет собой такую совокупность функционально подобных основных и резервных элементов, отказ которых вызывает неустранимый отказ всей системы;

• формирование критериев предельного состояния для системы. Предельным состоянием элемента является его неустранимый отказ. Отказ элемента неустраним, если, например, исчерпан резерв и ЗИП. Неустранимый отказ элемента, который вызывает отказ системы, означает переход системы в её предельное состояние;

• прогнозирование остаточного ресурса узлов и системы в целом. Показатели остаточного ресурса определяются по эмпирической зависимости вероятности безотказной работы узла (по отношению к неустранимым отказам) от наработки. Остаточный ресурс системы может прогнозироваться двумя способами:

1) по результирующей зависимости вероятности безотказной работы системы от наработки, рассчитываемой на основе аналогичных функций узлов;

2) по остаточному ресурсу наиболее «слабого» в смысле долговечности узла. В качестве количественных оценок показателей остаточного ресурса используются средний и гамма-процентный остаточные ресурсы.

Для эффективного решения задач прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса систем, повышения их долговечности актуальными являются:

• совершенствование приборного контроля, повышение точности, применение передовых методов контроля технического состояния и методов неразрушающего контроля;

• автоматизация сбора, обработки и хранения эксплуатационной информации на базе универсальных измерительных аппаратно-программных комплексов, разработка и ведение базы данных мониторинга технического состояния систем, разработка форм эксплуатационных документов для сбора данных, необходимых для прогнозирования остаточного ресурса систем, формирование перечня критичных с точки зрения надёжности элементов исследуемых систем для контроля;

• детальная проработка перечня контролируемых параметров, мест, методов и технологий измерений, приборов для контроля и их класс точности, периодичность контроля.

В качестве базового средства измерения при мониторинге технического состояния необходимо использовать аппаратно-программные комплексы по сбору и обработке измерительной информации на базе персональных компьютеров, которые дают высокую точность и оперативность измерений, предоставляют широкие возможности при обработке и хранению результатов, многофункциональность, высокую мобильность, относительно низкую стоимость (по сравнению с общей стоимостью заменяемых приборов).

Результаты применения неразрушающего контроля могут быть полезными при обосновании оптимальных объёмов ремонтно-восстановительных работ, обеспечивающих заданное (или максимально возможное при выделенном количестве средств на ремонт) продление технического ресурса анализируемых систем.

Список литературы:

1. Баженов В.В. Диагностирование и неразрушающий контроль роторов электродвигателей нефтеперекачивающих агрегатов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2003. – № 62. – С. 59–67.

2. Галиева Р.А. Анализ методов неразрушающего контроля при обследовании участков трубопроводов // Булатовские чтения. – 2017. – Т. 4. – С. 126–129.

3. Анализ результатов коррозионного мониторинга Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / А.Н. Горпинченко [и др.] // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ – 2023: Материалы XXIV Международной молодёжной научной конференции (30–31 марта 2023 года, г. Ухта). – Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2023. – С. 352–359.

4. Заславский В.А. Роль и место методов неразрушающего контроля для обеспечения надёжности и долговечности сложных систем с высокой ценой отказа / В.А. Заславский, И.Н. Каденко // Неразрушающий контроль. – 1999. – № 1. – С. 15–22.

5. Коваленко А.Н. Неразрушающий контроль сварных швов магистральных газо- и нефтепроводов магнитным методом // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 10. – С. 51–56.

6. Коробкин С.В. Комплекс применения методов неразрушающего контроля и его эффективность / С.В. Коробкин, Д.Н. Торопкова // Студенческие научные достижения: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса (05 ноября 2018 года, г. Пенза). – Пенза : Издательство «Наука и Просвещение», 2018. – С. 36–38.

7. Неразрушающий контроль нефтегазопромыслового оборудования и трубопроводов – залог их надёжной работы / В.Ф. Мужицкий [и др.] // Территория Нефтегаз. – 2006. – № 4. – С. 24–27.

8. Нагучева З.В. Сравнение методов неразрушающего контроля сварных соединений резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов / З.В. Нагучева, П.С. Кунина, М.А. Меретуков // Приоритетные направления современной науки и образования: актуальные вопросы и достижения: материалы Всероссийской научно-практической конференции (28 июня 2021 года, г. Чебоксары). – Чебоксары : Экспертно-методический центр, 2021. – С. 199–203.

9. Рагузин М.Г. Неразрушающий контроль при проведении экспертизы промышленной безопасности технических устройств, применяемых на объектах добычи нефти и газа // Инженер-нефтяник. – 2014. – № 4. – С. 44–48.

10. Стефанов Р.Е. Анализ технического состояния нефтепровода при выборе способа капитального ремонта // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 3. – С. 196–214.

11. Стефанов Р.Е. Проведение капитального ремонта нефтепровода с заменой труб // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 3. – С. 215–241.

12. Стефанов Р.Е. Анализ состояния магистрального газопровода и моделирование системы «газопровод – массив грунта» // Технические и технологические системы: Материалы XIII Международной научной конференции «ТТС-22» (22–24 ноября 2023 года). – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2023. – С. 315–323.

13. Тухватуллина Р.А. Неразрушающий контроль в нефтегазовом комплексе // Новые технологии – нефтегазовому региону: Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (24–28 апреля 2017 года, г. Тюмень). – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2017. – Т. 5. – С. 330–331.

14. Рентгенографический метод контроля качества сварных соединений магистральных нефтепроводов, как фактор эффективной диагностики / С.И. Шиян [и др.] // REFERATOTECH: Материалы II Международной научно-практической конференции (23 октября 2021 года, г. Краснодар) : в 2 т. – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2022. – Т. 2. – С. 309–314.

15. Щипачев А.М. Прогнозирование остаточного ресурса газонефтепроводов методом нейросетевого моделирования / А.М. Щипачев, И.Р. Лапига // Булатовские чтения. – 2018. – Т. 4. – С. 119–124.

List of references:

1. Bazhenov V.V. Diagnostics and non-destructive testing of rotors of electric motors of oil pumping units // Problems of collection, preparation and transportation of oil and oil products. – 2003. – № 62. – P. 59–67.

2. Galiyeva R.A. The analysis of methods of nondestructive control at inspection of sites of pipelines // Readings of A.I. Bulatov. – 2017. – Vol. 4. – P. 126–129.

3. Analysis of the results of corrosion monitoring of the Urengoy oil and gas condensate field / A.N. Gorpinchenko [et al.] // SEVERGEOECOTECH – 2023: Proceedings of the XXIV International youth scientific conference (March 30–31, 2023, Ukhta). – Ukhta : Ukhta state technical university, 2023. – P. 352–359.

4. Zaslavsky V.A. The role and place of non-destructive testing methods to ensure reliability and durability of complex systems with a high cost of failure / V.A. Zaslavsky, I.N. Kadenko // Non-destructive testing. – 1999. – № 1. – P. 15–22.

5. Kovalenko A.N. Non-destructive testing of main gas- and oil pipe lines welds by magnetic method // Control. Diagnostics. – 2008. – № 10. – P. 51–56.

6. Korobkin S.V. Complex application of nondestructive testing and its effectiveness / S.V. Korobkin, D.N. Toropova // Student scientific achievements: Collection of articles of the International scientific research competition (November 05, 2018, Penza). – Penza : Publishing house «Science and Education», 2018. – P. 36–38.

7. Non-destructive testing of oil and gas production equipment and pipelines – the key to their reliable operation / V.F. Muzhitsky [et al.] // Territory of Neftegaz. – 2006. – № 4. – P. 24–27.

8. Nagucheva Z.V. Comparison of non-destructive testing methods for welded joints of storage tanks for oil and oil products / Z.V. Nagucheva, P.S. Kunina, M.A. Meretukov // Priority areas of modern science and education: current issues and achievements: Materials of the All-Russian scientific and practical conference (June 28, 2021, Cheboksary). – Cheboksary : Expert and methodological center, 2021. – P. 199–203.

9. Raguzin M.G. Non-destructive testing during industrial safety examination of technical devices used at oil and gas production facilities // Petroleum Engineer. – 2014. – № 4. – P. 44–48.

10. Stefanov R.E. Analysis of the technical condition of an oil pipeline when choosing a method of overhaul repairs // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. – № 3. – P. 196-214

11. Stefanov R.E. Oil pipeline overhaul repair with pipes replacement // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2023. – № 3. – P. 215–241.

12. Stefanov R.E. Analysis of the state of the main gas pipeline and modeling of the «gas pipeline – soil massif» system // Technical and technological systems: materials of the XIII International scientific conference «TTS-22» (November 22–24, 2023, Krasnodar). – Krasnodar : LLC «Publishing House – Yug», 2023. – P. 315–323.

13. Tukhvatullina R.A. Non-destructive testing in the oil and gas complex // New technologies for the oil and gas region: materials of the International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists (April 24–28, 2017, Tyumen). – Tyumen : Tyumen industrial university, 2017. – Vol. 5. – P. 330–331.

14. X-ray method of quality control of welded connections of oil pipelines as a factor of effective diagnostics / S.I. Shiyan [et al.] // REFERATOTECH: Proceedings of the II International scientific and practical conference (October 23, 2021, Krasnodar) : in 2 vol. – Krasnodar : LLC «Publishing House – Yug», 2022. – Vol. 2. – P. 309–314.

15. Shchipachev A.M. Forecasting resources oil and gas pipelines by method of neuro network modeling / A.M. Shchipachev, I.R. Lapiga // Readings of A.I. Bulatov. – 2018. – Vol. 4. – P. 119–124.