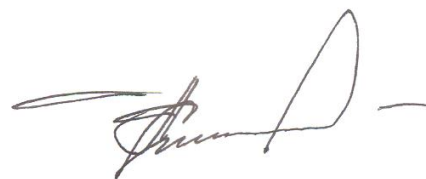


На правах рукописи



ЧЕРЕПАНОВ АНАТОЛИЙ ПЕТРОВИЧ

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА СОСУДОВ
И АППАРАТОВ ПО КОРРОЗИОННОМУ ИЗНОСУ,
СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ И ОБЪЕМАМ ТЕХНИЧЕСКОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

Специальность:

05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ангарск - 2013

Работа выполнена в Научно-диагностическом центре Открытого акционерного общества «Ангарская нефтехимическая компания»

Научный консультант: Доктор технических наук, член-корреспондент РАН, председатель Рабочей группы при Президенте РАН по анализу риска и проблем безопасности
Махутов Николай Андреевич

Официальные
оппоненты: Доктор технических наук, профессор, директор СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, заведующий кафедрой «Диагностика и безопасность технических систем» Политехнического института Сибирского федерального университета
Москвичев Владимир Викторович

Доктор технических наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, генеральный директор Научно - технического центра «АПМ»
Шелофаст Владимир Васильевич

Доктор технических наук, профессор, кафедра «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВПО «Забайкальский государственный университет»
Березин Сергей Яковлевич

Ведущая организация: Автономная некоммерческая организация Сибирский центр технической диагностики и экспертизы «ДИАСИБ» (АНО СЦТДЭ «ДИАСИБ») г. Новосибирск.

Защита состоится «06» декабря 2013 г. в 9-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.018.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Братский государственный университет" (ФГБОУ ВПО "Братский государственный университет") по адресу: Россия, 665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко 40 ФГБОУ ВПО "Братский государственный университет" конф.–зал. (К–амф.).

Тел: (3953) 32 – 53 – 63; Факс: (3953) 33 – 54 – 12; E-mail: efremov@brstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО "Братский государственный университет".

Автореферат разослан 01.11.2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Ефремов И.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Прогнозирование ресурса технических устройств, в том числе сосудов и аппаратов опасных производств, подразумевает принятие решения о сроках их безопасной эксплуатации, обеспечение которой достигается использованием существующих и созданием новых методов ресурсно-прочностных исследований (РПИ), направленных на получение данных по техническому состоянию (ТС) обработкой результатов технического диагностирования (ТД), определение прочности и оценку ресурса.

В Федеральных Законах России "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.1997 г. № 116–ФЗ, "О техническом регулировании" от 27.12.2002 г. №184–ФЗ и вышедших на их основе нормативных документов в области промышленной безопасности, в основу требований безопасности заложен принцип (гипотеза):

Техническое устройство (ТУ) может эксплуатироваться до тех пор, пока его элементы, материал, сварные швы, разъемные соединения не изменят своих размеров и физических характеристик до величин, не гарантирующих восприятие эксплуатационных нагрузок без разрушения, в том числе, и в аварийных ситуациях.

Фундаментальная постановка проблем прочности, риска и безопасности предусмотрена федеральной целевой программой "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы", утвержденной Постановлением Правительства Российской Федерации от 17 октября 2006 года № 613.

Применяемые методы прогнозирования ресурса ТУ типа сосудов и аппаратов (СиА) опасных производств, которые эксплуатируются с превышением исходного (проектного) или назначенного срока службы, обусловлены погрешностями от 50% до 114%, поэтому одна из мер обеспечения промышленной безопасности состоит в совершенствовании методов прогнозирования ресурса. Как показал опыт работы автора с 2004 года в качестве эксперта промышленной безопасности, не менее 91% СиА по окончании назначенного срока службы не исчерпали проектных запасов прочности и работоспособны. Около 9% из них требуют ремонта мест язвенных поражений, усиления или замены отдельных элементов, например патрубков. Одной из причин низкой точности оценки ресурса является недостаточность обоснования закономерности перехода между техническими состояниями (ТС), включая переход от исходного (ИТС) к фактическому (ФТС) и к предельному (ПТС). Другая причина состоит в недооценке объемов ТД, степени коррозионного износа и степени опасности разрушения СиА. Недостаточность учета затрат времени на ТД и РПИ при планировании остановочных ремонтов и экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) влечет некачественное или неполное их проведение, что повышает вероятность аварий СиА. Не в полной мере автоматизирована обработка данных по ТС, прогнозированию ресурса СиА по результатам ТД и ЭПБ. Многокритериальная система оценки ресурса, приведенная в работах Махутова Н.А., открывает новые возможности для совершенствования методов прогнозирования ресурса СиА. Необходимость разра-

ботки автоматизированных комплексов обработки данных по исходному и фактическому ТС, методов прогнозирования *исходного* ресурса при проектировании, *назначенного* при изготовлении и *остаточного ресурса* при ТД по коррозионному износу, степени опасности разрушения СиА и объемам технического диагностирования, не теряет своей актуальности.

Цель работы: Разработка метода прогнозирования ресурса СиА по коррозионному износу, объемам ТД и степени опасности разрушения СиА.

Цель достигается решением следующих задач:

1. Применением в качестве показателей ресурса коррозионного износа и коррозионной стойкости материалов, запасов толщины стенок и запасов прочности элементов, объемов ТД и степени опасности разрушения СиА.
2. Разработкой расчетной модели прогнозирования ресурса по коррозионному износу до наступления ПТС с учетом объемов проведения ТД и степени опасности разрушения СиА.
3. Разработкой комплекса компьютерной обработки результатов ТД, проведения РПИ и прогнозирования ресурса СиА.

Научная новизна

1. Разработан метод прогнозирования ресурса, основанный в отличие от известных, на закономерности перехода от ИТС или ФТС к ПТС по степени коррозионного износа, с учетом дефектности, объемов контроля при ТД и степени опасности разрушения СиА. Метод дает возможность определять прочностной резерв элементов, а по наиболее слабому из них назначать ресурс СиА.
2. Разработана модель прогнозирования ресурса на протяжении всего жизненного цикла, в которой переход от ИТС и ФТС к ПТС определяется по степени коррозионного износа, запасам толщин стенок и запасам прочности элементов, объемам ТД и степени опасности разрушения СиА.
3. Получена зависимость ресурса и исследована область ее допустимых значений при изменении запасов толщины стенок и запасов прочности, объемов ТД и степени опасности разрушения СиА.
4. Создан комплекс компьютерной обработки результатов ТД и проведения РПИ (КомКОРД) для реализации метода прогнозирования ресурса по коррозионной стойкости материала, запасам толщины стенок и запасам прочности, степени коррозионного износа, показателю эффективности ТД и степени опасности разрушения СиА.
5. Впервые разработана поточно-ориентированная технология, направленная на объединение в единый технологический процесс ТД, РПИ и ЭПБ, включая разработку рекомендаций на ремонт, прогнозирование ресурса и разработку заключений ЭПБ.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Метод прогнозирования ресурса на основе закономерности перехода от ИТС к ФТС, решает задачу обеспечения безопасности СиА на протяжении жизненного цикла от проектирования до достижения ПТС.
2. Автоматизацией обработки результатов ТД и проведения РПИ реали-

зован метод прогнозирования ресурса по проектным и фактическим эксплуатационным параметрам с учетом степени коррозионного износа, дефектности, показателя эффективности ТД и степени опасности разрушения СиА.

3. Единые технологические требования к проведению РПИ в зависимости от объема неразрушающего контроля при ТД предназначены для определения эффективности, трудоемкости и стоимости ЭПБ различных типов СиА.

4. Внедрение КомКОРД в Научно-диагностическом центре ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» позволило автоматизировать процесс РПИ при оценке прочности, прогнозировании ресурса СиА, в том числе его замененных по причине изношенности элементов, и, как следствие, сократить время их простоя в ремонте.

5. Реализация автоматизированной системы промышленной безопасности предприятия и комплекса компьютерной обработки результатов ТД, проведения РПИ и прогнозирования ресурса, снижает трудоемкость ЭПБ различных типов СиА.

Соответствие паспорту специальности 05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (по отраслям): пункт 7. Разработка и повышение эффективности методов технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации и продления ресурса.

Методика исследования. Зависимости для прогнозирования ресурса исследованы имитационным моделированием путем варьирования конструктивных и эксплуатационных параметров с использованием численных методов и современных вычислительных прикладных программ MathCAD, Microsoft Office Excel и APM WinMachine, которые позволили получить данные экспериментальных исследований с точностью, достаточной для обоснования диапазона их допустимых значений.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, содержащихся в работе, подтверждена корректным построением математической модели прогнозирования ресурса. Применением поверенного метрологического и испытательного оборудования при ТД различных типов СиА, стандартных методов расчета прочности, сертифицированных и верифицированных пакетов компьютерных программ при проведении РПИ.

Обоснованность метода прогнозирования ресурса подтверждена работоспособностью СиА за пятнадцатилетний период их эксплуатации в условиях действующего производства ОАО «Ангарская нефтехимическая компания».

Автор защищает:

1. Концепцию прогнозирования ресурса с использованием многокритериальной системы оценки ресурса в соответствии с требованиями промышленной безопасности для СиА опасных производств.

2. Метод прогнозирования ресурса по коррозионному износу и коррозионной стойкости материала, запасам прочности, объемам ТД и степени опасности разрушения СиА.

3. Результаты создания поточно-ориентированной технологии, направленной на объединение в единый технологический процесс ТД, РПИ и ЭПБ, включая разработку рекомендаций на ремонт, прогнозирование ресурса и разработку заключений ЭПБ.

4. Применение КомКОРД для реализации метода прогнозирования ресурса по коррозионному износу и коррозионной стойкости материала, запасам прочности, дефектности, степени опасности разрушения СиА и замены его изношенных элементов.

Реализация и внедрение результатов работы:

1. Комплекс компьютерной обработки использован при ТД 3677 сосудов, аппаратов и вертикальных цилиндрических резервуаров нефтехимических производств ОАО «Ангарская нефтехимическая компания», ОАО «Завод катализаторов и органического синтеза», ОАО «Завод полимеров» (НК «Роснефть», г. Ангарск).

2. Годовой экономический эффект при внедрении комплекса компьютерной обработки результатов РПИ при ТД сосудов, аппаратов и вертикальных цилиндрических резервуаров технологических установок ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» составил 2582994 рубля.

3. Внедрение автоматизированной системы ЭПБ различных типов СиА опасных производств сокращает трудоемкость проведения ТД и ЭПБ, и как следствие, время простоя СиА и всей технологической установки в ремонте.

4. Введено в действие Положение ОАО «АНХК» № ПЗ-05 Р-0109 ЮЛ-100 «Об организации экспертизы промышленной безопасности технических устройств, зданий и сооружений».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

1. На 3-ей международной конференции «Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике». Г. Москва, РОНКТД. 2002 год.

2. На научном семинаре «Прочность и надежность нефтегазового оборудования». Москва, ГУП НИКИЭТ в 2001 году.

3. На региональной научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования в процессе эксплуатации» в рамках выставки «Приборы и оборудование для неразрушающего контроля и технической диагностики» (16-19 октября, 2001 г.). Иркутск «Сибэкспоцентр», 2001 год.

4. На 2-м Ежегодном Международном Восточносибирском нефтесервисном конгрессе, проведенным Национальным отраслевым журналом «Нефтегазовая Вертикаль» в г. Красноярске 24-25 сентября 2009 год.

5. На научно-практической конференции «Сильфонные компенсаторы – как основа обеспечения безопасности трубопроводов» 15 марта 2011 года, Иркутск.

6. На семинаре главных механиков «Нормативно-техническая база по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту нефтеперерабатыва-

ющего и нефтехимического оборудования и актуальные вопросы ее применения в современных условиях» Москва 14 февраля – 17 февраля 2011 г.

7. На IX Научно-технической конференции с международным участием «Исследования, проектирование, изготовление, стандартизация и техническая диагностика оборудования, трубопроводов, работающих под давлением» ИркутскНИИхиммаш, 22 сентября 2011 г.

8. На XI Международной научно-практической конференции «Кулагинские чтения» ЗабГУ, Чита, 30 ноября 2011 г.

9. На Международной научно-практической конференции «Проблемы обеспечения качества производства и услуг» ЗабГУ, г. Чита 8-9 декабря 2011.

10. На семинаре, проведенном НТЦ АПМ в г. Королеве с 14 по 20 апреля 2012 г.

11. Работа доложена на научных семинарах в ФГБОУ ВПО "Братский государственный университет" 30 ноября 2012, в СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН 14 февраля 2013 и в ОАО «ИркутскНИИхиммаш» 22 марта 2013 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования материалов докторских диссертаций и 4 изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 6 глав, заключение и выводы, всего 317 страниц, 106 рисунков, 18 таблиц и приложения. Библиографический список содержит 365 наименований. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность метода прогнозирования ресурса СиА. Дана краткая характеристика направления работы, сформулирована цель, задачи, ее научное, практическое значение и основные положения.

В первой главе изложено современное состояние и анализ существующих методов прогнозирования ресурса СиА при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Проблемам безопасности, ресурса, несущей способности СиА с использованием вероятностных моделей теории надежности, трещиностойкости и живучести машин с учетом повреждений технологического и эксплуатационного происхождения, механике деформирования и разрушения посвящены работы Алымова В.Т., Бармаса В.Ю., Бермана А.Ф., Болотина В.В., Барышова С.Н., Вострова В.К., Гаденина М.М., Горицкого В.М., Гуськова А.В., Давиденкова Н.Н., Краковского Ю.М., Лепихина А.М., Маннапова Р. Г., Махутова Н.А., Кудрявцева И.В., Митрофанова А.В., Мирочника В.Л., Москвичева В.В., Пермькова В.Н., Пимштейна П.Г., Серенсена С.В., Сидорова В.И., Сеницына Е.Н., Чернявского О.Ф., Хенли Дж.Э., Кумамото Х., и других ученых. Исследования по ресурсу, живучести и безопасности СиА проводятся в Институте машиноведения РАН, Институте динамики систем и теории управления СО РАН, отраслевых научно-исследовательских институтах ВНИИНЕФТЕМАШ, ВНИИНефтехимоборудования, СКТБ «Наука» КНЦ СО РАН, ИркутскНИИхиммаш, НИКИЭТ, НИИхиммаш, НТП «Трубопровод»,

ОАО «Системы и технологии обеспечения безопасности», «Техдиагностика», ЦНИИПСК им. Мельникова и других научно-исследовательских организациях.

Системы расчета и проектирования СиА с использованием пространственных конечных элементов MSC/NASTRAN for Windows, ANSYS Structural, ANSYS Mechanical, COSMOS Works и др. получили широкое признание. Отечественная система APM WinMachine, разработанная Шелофастом В.В., служит для расчета элементов и конструкций по запасам прочности с использованием МКЭ. В рамках экспертной системы, предложенной Махутовым Н.А., неразрушающими методами ТД определяют наличие в конструкции дефектов, их размеры и скорости их развития. Исследования запасов прочности конструкций проводились Дорониным С.В., Лепихиным А.М., Махутовым Н.А., Москвичевым В.В., Серенсенем С.В., Шокиным Ю.И. и другими учеными и исследователями. Методам и средствам ТД, контроля ТС с определением уровня эксплуатационных повреждений посвящены работы Ключева В.В., Соснина Ф.Р., Филинова В.Н. и многих других ученых и инженеров. В последние годы появились методы и приборы неразрушающего контроля и измерения механических напряжений, разработанные Жуковым С.В., Жуковым В.С. «ДИМЕНСТЕСТ», Дубовым А.А. «Энергодиагностика», «ИНКОТЕС», «Спектр» и др.

Проведен анализ методов оценки надежности и ресурса, в частности, РД 26.260.005-91 «Методические указания. Оборудование химическое. Номенклатура показателей и методы оценки надёжности», РД 03-421-01 «Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы СиА (М.: ГУП "НТЦ« Промышленная безопасность», 2002. - 136 с.), ДиОР-05 «Методика диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование», которые предусматривают поверочные прочностные расчеты, оценку остаточного ресурса и разработку мероприятий по безопасной эксплуатации СиА.

Запасы прочности по местным напряжениям и деформациям в работах Махутова Н.А. рекомендованы не ниже 1,15–1,25. Коэффициенты запаса по ресурсу предложено принимать не ниже 3–5, а при циклических нагрузках до 10. Многокритериальная система оценки показателей надежности, остаточного ресурса и требований безопасности в работах Махутова Н.А. выражена условием

$$\{\sigma^3, e^3, K_{le}^3, N^3, \tau^3, t^3\} = f(P^3, t^3, l^3) \leq \left\{ \frac{\sigma_c}{n_\sigma}, \frac{e_c}{n_e}, \frac{N_c}{n_N}, \frac{\tau_c}{n_\tau}, \frac{t_c}{n_t} \right\}, \quad (1)$$

где σ – напряжения, e – деформации, K_{le} – коэффициент интенсивности деформаций, N – количество циклов, τ – эксплуатационный ресурс, t – длительность эксплуатации в зависимости от давления – P , температуры – t , размеров дефектов – l . Индексом "э" представлены эксплуатационные, с индексом "с" – критические параметры; $n_\sigma, n_e, n_N, n_\tau, n_t$ – нормируемые запасы по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и температуре.

Функционал долговечности, предложенный Махутовым Н.А., показывает, что запас прочности является величиной переменной, с течением времени снижается по мере износа, появления дефектов и деградации материала, снижения несущей способности и увеличения механических напряжений элементов. Там же введено понятие коэффициента безопасности. В справочнике «Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц и др. Изд. 2-е, дополненное. Иркутск: Издание ГП "Иркутская областная типография №1", 1999. 600 с.» полный запас прочности представлен произведением нормативного n_n и избыточного $n_{из}$ (дополнительного) коэффициентов запаса прочности

$$n_{полн} = n_n \cdot n_{из} . \quad (2)$$

Там же по избыточному (дополнительному) запасу прочности на момент ТД слабое звено предложено определять условием

$$n_{из} = \min \left\{ \frac{[P]}{P}; \frac{[\sigma]}{\sigma}; \frac{[\sigma]_{экр}}{\sigma_{экр}}; \frac{[K]_I}{K_I}; \frac{[N]}{N}; \frac{[B]}{B}; \frac{[Y]}{Y} \right\}, \quad (3)$$

где $[P]$; $[N]$; $[B]$; $[Y]$; $[\sigma]$; $[\sigma]_{экр}$; $[K]_I$ – допускаемые параметры, заданные при проектировании; P ; N ; B ; Y ; σ ; $\sigma_{экр}$; K_I – эксплуатационные параметры, включая постоянные, циклические нагрузки, ползучести, устойчивости, эквивалентные напряжения (или амплитуды напряжений при циклических нагрузках), коэффициенты интенсивности напряжений.

Коэффициент дефектности, приведенный в данном справочнике, показывает степень опасности дефектов, обнаруженных на различных стадиях жизненного цикла СиА. Если один и тот же дефект появляется на протяжении эксплуатации неоднократно, то вероятность последующего его появления должна быть учтена при оценке ресурса.

Модель слабого звена (распределение минимума независимых случайных величин) изложена в научном издании «Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем / Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В. и Шокин Ю.И. Новосибирск: «Наука» 2005. 249 с.». Слабое звено определяется по минимальным запасам прочности постоянных, циклических нагрузок, ползучести, хрупкости, эквивалентных напряжений (или амплитуды напряжений при циклических нагрузках), общей и местной устойчивости в пределах нормативных запасов прочности элементов СиА условием

$$n_{(k)min} = \min (n_p; n_\sigma; n_{\sigma_{экр}}; n_N; n_{\Pi}; n_K; n_Y) > n_n . \quad (4)$$

Определению объемного напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочек СиА и зон их сопряжения с другими элементами, например патрубками, методами конечных элементов (МКЭ) посвящены работы Драгунова Ю.Г., Пимштейна П.Г., Татаринова В.Г. Цвика Л.Б. и многих других. Натурные эксперименты на моделях отдельных элементов конструкции проводились, например, по оценке напряженного состояния зон патрубков сосудов, преимущественно на моделях из полимерных материалов.

Оценка прочности образцов с концентраторами, разработанных с участием автора (Пат. Рос. Федерации № 2360227 и № 2418284), проводилась

компьютерным моделированием с использованием расчетных комплексов MSC/NASTRAN и APM WinMachine.

В исследованиях Митрофанова А.В. и Барышова С.Н. распределение по уровням вероятности отказа элементов SiA $Va_i = f(T_o; T_n; Kl_i)$ характеризуется нормативным периодом эксплуатации T_n от прогнозируемого значения остаточного ресурса T_o до наступления предельного состояния по доминирующему механизму повреждения с учетом качества Kl_i , установленного при ТД. В работах Махутова Н.А. и Пимштейна П.Г. применены линейные и нелинейные зависимости прогнозирования ресурса. В работах Бермана А.Ф. отмечается, что эффективность, качество диагностирования и прогнозирования сужает объем исследований по установлению причин вероятных или имеющих место повреждений на всех стадиях жизненного цикла технических систем. В ОДМ 218.4.001-2008 «Методические рекомендации по организации обследования и испытания мостовых сооружений на автомобильных дорогах. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). Москва 2008» приведено понятие износа как показателя состояния элемента, отражающего степень снижения его функциональных качеств. По патенту РФ № 2006811 оценка степени износа осуществляется косвенным путем без разборки подшипников. Для опасных производств, субъективных оценочных характеристик недостаточно из-за низкой достоверности результатов.

Анализ существующих методов прогнозирования ресурса SiA показал, что в них недостаточно обоснована взаимосвязь между *исходным* ресурсом, принимаемым при проектировании по наработке на отказ, *назначенным* в пределах 20 лет при изготовлении и *остаточным* ресурсом, определяемым при ТД. В них не учтены степень опасности разрушения SiA и объемы ТД. Прогнозирование ресурса проводится непосредственно по результатам ТД, минуя РПИ, при усилении или замене изношенных элементов SiA не предусмотрена оценка их ресурса.

Во второй главе представлены результаты оценки исходного и фактического технического состояния и их влияния на ресурс SiA .

В качестве примера приведены результаты анализа ФТС SiA , включая емкости, холодильники и теплообменники нефтехимического производства ОАО «АНХК» по данным ТД в 2012 году, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты анализа ФТС SiA нефтехимического производства ОАО «АНХК» по данным ТД в 2012 году

Тип сосуда или аппарата	Общее количество, штук	Коррозия		Общие дефекты корпуса		Дефекты сварных швов		Замена патрубков	Не имеют дефектов
		до 0,1 мм/год	Язвенная	Местные угонения	Трещины	Поры	Непротравы		
Емкости	43	42	1	-	-	12	7	14	8
Холодильники	29	26	3	3	1	-	-	-	24
Теплообменники	113	108	5	1	3	23	3	11	71
Итого	185	176	9	4	4	35	10	25	103

Анализ показал, что у 55,7% SiA выявлен только коррозионный износ узлов и элементов, что на 2,3% ниже среднестатистических показателей, со-

ставляющих 57%. У всех исследованных СИА наряду с коррозионным износом имеются другие дефекты. В том числе, местные утонения и трещины элементов корпусов имеют 4,3% СИА. Дефекты сварных швов обнаружены у 24,3% СИА. Это ниже среднестатистических показателей, составляющих 62% от общего числа дефектов, включая дефекты сварных швов. По результатам РПИ проведен ремонт 13,5% СИА путем замены патрубков диаметром до 100 мм с исходными толщинами до 4 мм, устранением дефектов в виде пор и восстановлением изношенных сварных швов. Заменено 2 емкости и 2 теплообменника по причине недопустимого коррозионного износа, другие СИА допущены к эксплуатации на срок от 2 до 8 лет.

Сравнение результатов со среднестатистическими данными показывает, что преобладающим фактором износа при среднем сроке эксплуатации 36,2 года СИА нефтехимического производства ОАО «АНХК», работающих при давлениях до 10 МПа и температурах до 300 °С, является коррозионный износ, которому подвержены 95,13% СИА при взаимодействии материалов их элементов с различными химически активными средами нефтехимических производств. Коррозионный износ рассмотрен в качестве показателя, необходимого для прогнозирования ресурса

СИА при снижении толщин стенок его элементов или появления коррозионных дефектов. Проведение РПИ рассмотрено на примере расчета обечайки сосуда. Обозначения величин, входящих в расчет толщины стенки показаны на рис. 1 и далее пояснены по ходу расчета. Согласно ГОСТ Р 52857.1-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования» расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки определена по формуле

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - P} \quad (5)$$

Минимальная толщина стенки обечайки, которая может выдержать нагрузку от внутреннего давления $P=0.92$ МПа определена формулой

$$S_{min} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma_T \cdot \varphi - P} \quad (6)$$

В соответствии с названным стандартом $n_H = \frac{\sigma_T}{[\sigma]}$ служит нормативным запасом прочности по пределу текучести материала при износе стенки до толщины S_p . При износе стенки до толщины S_{min} будет достигнута величина запаса $n_H=1$, наступит предел текучести материала и возможно разрушение стенки. Исходная толщина задается формулой, не приведенной в литера-

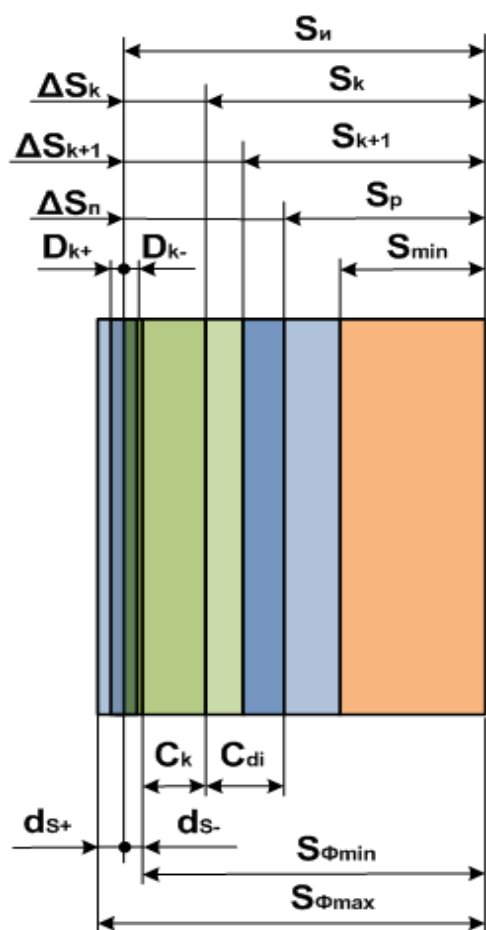


Рис. 1. Обозначения величин, входящих в расчет толщины стенки сосуда

туре: $S_{и} = (S_p + C_{di}) + C_k$, где C_k – конструктивная прибавка, которая образуется округлением суммы $(S_p + C_{di})$ до стандартной толщины листа или трубы и создает избыточность исходной толщины стенки; C_{di} – прибавка к расчетной толщине для компенсации износа (коррозии), которая обычно задана исходя из условия назначаемого ресурса $T_э = 20$ лет и скорости коррозии $V_k = 0,1$ мм/год. Например, согласно ГОСТ 19903-74, при ширине листа до 1500 мм и толщине $S_{и} = 16$ мм, верхнее предельное отклонение толщины стенки составляет $d_{s(+)} = +0,3$ мм, нижнее – $d_{s(-)} = -0,8$ мм. На момент изготовления с учетом предельных отклонений на толщину листа $16^{+0,3}_{-0,8}$ мм определены:

- максимальная фактическая толщина $S_{ф max} = S_{и} + d_{s(+)} = 16 + 0,3 = 16,3$ мм;
- минимальная фактическая толщина $S_{ф min} = S_{и} - d_{s(-)} = 16 - 0,8 = 15,2$ мм.

По приведенной в РД 03-421-03 формуле оценки остаточного ресурса сосудов при снижении исходной толщины стенки с заданной средней скоростью коррозии 0,1 мм/год за весь срок эксплуатации до ее полного износа, равного $\Delta S_{п} = S_{и} - S_p = 16 - 7,9 = 8,1$ мм, рассчитан номинальный исходный ресурс безопасной эксплуатации $T_{п} = \frac{\Delta S_{п}}{V_k} = \frac{S_{и} - S_p}{V_k} = \frac{16 - 7,9}{0,1} = 81$ год.

Погрешность оценки ресурса рассчитана подстановкой взамен исходной толщины $S_{и}$, фактических значений $S_{ф min}$ и $S_{ф max}$ с учетом предельных отклонений толщины стенки по формулам

$$T_{o min} = \frac{S_{ф min} - S_p}{V_k} = \frac{15,2 - 7,9}{0,1} = 73 \text{ года}, \quad (7)$$

$$T_{o max} = \frac{S_{ф max} - S_p}{V_k} = \frac{16,3 - 7,9}{0,1} = 84 \text{ года}. \quad (8)$$

Суммарная погрешность оценки остаточного ресурса на момент изготовления аппарата составила 11 лет (13,16%) при номинальном ресурсе 81 год. Вводя в формулы (7 и 8) ошибку измерения, автором получена формула оценки текущего ресурса с учетом предельных отклонений и ошибки измерения

$$T_k = \frac{(S_{и} \pm d_s) - (S_k \pm D_k)}{V_k}, \quad (9)$$

где S_k – текущее значение толщины стенки, измеряемое при ТД; D_k – ошибка измерения, учитывающая качество подготовки зон контроля, их доступности, погрешности приборов и измерительных датчиков. Скорость коррозии по известной величине ресурса с учетом допусков на толщину листа и погрешностей измерения определена по формуле

$$V_k = \frac{(S_{и} \pm d_s) - (S_k \pm D_k)}{T_k}. \quad (10)$$

При принятии взамен расчетной толщины S_p текущих значений S_k , определяемых через промежутки времени первого (t_1), – второго (t_2), ..., – i -го (t_i) ТД при $k = 1 \dots i$ предложена формула для оценки ресурса на любом отрезке жизненного цикла с учетом предельных отклонений и ошибки измерения

$$T_k = \frac{S_{ф} - (S_k \pm D_k)}{V_k}. \quad (11)$$

В результате последующего измерения толщины стенки при вторичном ТД может быть определен износ за прошедший период времени ($k + 1$), тогда

$\Delta S_{(k+1)} = S_k - S_{(k+1)}$. Подставив в формулу (11) текущее значение $S_{(k+1)}$ взамен S_k предложена формула расчета ресурса с учетом износа на период эксплуатации $(k+1)$, которая имеет вид

$$T_{(k+1)} = \frac{\Delta S_{(k+1)}}{V_k} = \frac{S_k - (S_{(k+1)} \pm D_{(k+1)})}{V_k}. \quad (12)$$

По окончании периода $(k+1)$ остаточный ресурс, определенный по результатам последующего ТД, составит

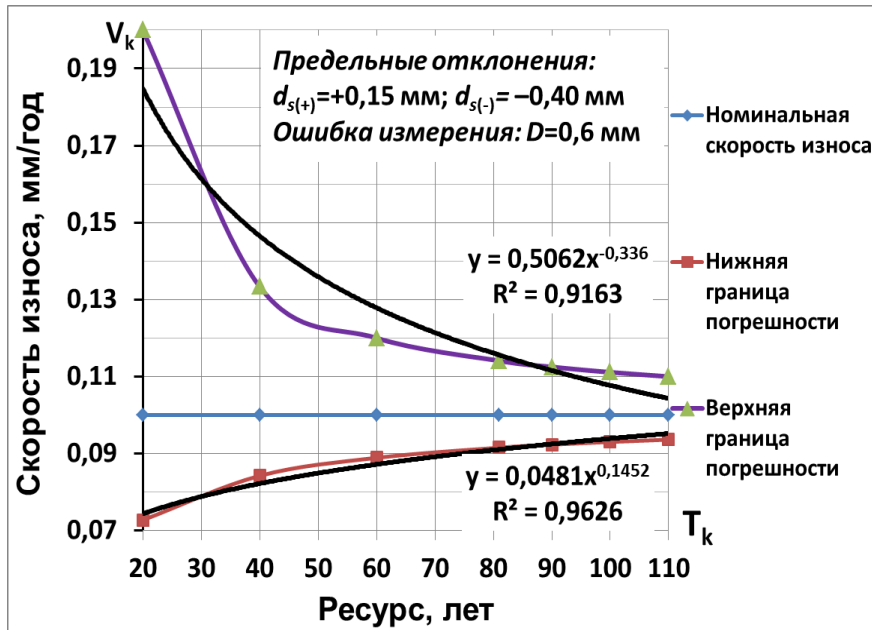
$$T_o = \frac{(S_{(k+1)} \pm D_{(k+1)}) - S_p}{V_k}. \quad (13)$$

В таблице 2 показаны результаты расчета численных значений ресурса T_k , скоростей износа $V_{k \min}$ и $V_{k \max}$ при снижении толщины стенки. Погрешность расчета скорости коррозии с учетом допусков на толщину и ошибки измерения $D_k = 0,6$ мм показана на рис. 2.

Таблица 2. Расчет численных значений ресурса T_k при снижении толщины стенки с учетом предельных отклонений $d_{s(-)} = 0,4$ мм, $d_{s(+)} = 0,15$ мм и ошибки измерения $D_k = 0,6$ мм

№ п/п	Толщина стенки, мм			Из- нос, мм	Скорость кор- розии, мм/год			Номи- наль- ный ре- сурс, лет	Расчет погрешности ресурса, лет				
	Исход- ная	Теку- щая	Рас- чет- ная		но- ми- наль- ная	с учетом до- пусков и ошибки из- мерения			с учетом пред. откл. $d_{s(-)}$ и $d_{s(+)}$		с учетом пред. откл. и ошибки изме- рения		
	S_n	S_k	S_p	ΔS_k	V_k	$V_{k\min}$	$V_{k\max}$	T_k	T_{k-}	T_{k+}	$T_{k\min}$	$T_{k\max}$	%
1	16	16.0	7.9	0	0.1	0,000	0,00	0	0	0	0	0	0
2		14.0		0.25		0,080	0,20	20	12	25	10	25	43,8
3		12.0		0.50		0,087	0,14	40	32	46	29	46	21,9
4		10.0		0.75		0,090	0,13	60	52	67	48	67	14,6
5		7.9		1.00		0,092	0,12	81	73	84	69	88	10,9
	Минимальная S_{min}												
6	16	7.0	5.26	1.71	0.1	0,092	0,12	90	82	98	77	98	9,7
7		6.0		1.90		0,095	0,11	100	92	105	90	105	8,7
8		5.0		2.09		0,096	0,11	110	102	114	101	114	8,0

Расчет показал, что при $d_{s(+)} = +0,3$ мм скорость износа на 0,09 мм/год выше номинальной скорости, а при $d_{s(-)} = -0,8$ мм ниже номинальной на 0,02 мм/год. В итоге суммарная погрешность скорости износа составляет 0,11 мм/год и соизмерима с номинальным ее значением. Например, при увеличении ошибки измерения на 0,5 мм погрешность ресурса с 7,5 лет возрастает до 17 лет, что соответствует 10,9%. При толщине стенки 14 мм погрешность ресурса составила 43,8%, при уменьшении толщины до 7,9 мм она снизилась до 10,9%, или 4.02 раза. Формулами (9 и 10) и графиком (рис. 2) установлено, что причины низкой точности прогнозирования ресурса по скорости коррозии состоят в необходимости учета предельных отклонений и ошибки измерения толщины стенки.



Предельные отклонения: $d_{s(+)}=+0,15$ мм; $d_{s(-)}=-0,40$ мм.
Ошибка измерения $D=0,6$ мм.

Рис. 2 - Погрешность скорости коррозии в зависимости от предельных отклонений и ошибки измерения

В качестве показателей оценки ТС автором предложены запасы толщины стенки, образованные их избыточностью, принятой при проектировании или определенной РПИ условием (3). Предельный, исходный и фактический (текущий) запасы толщины стенки, обозначенные как (ПЗТ, ИЗТ и ФЗТ), определены отношениями:

- ПЗТ на момент

$$\text{наступления ПТС} \quad n_{\text{н}}^{\text{с}} = \frac{S_{\text{p}}}{S_{\text{min}}} ; \quad (14)$$

$$\text{- ИЗТ от изготовления до наступления ПТС} \quad n_{\text{и}}^{\text{с}} = \frac{S_{\text{и}}}{S_{\text{p}}} ; \quad (15)$$

$$\text{-ИЗТ от изготовления до разрушения} \quad n_{\text{р}}^{\text{с}} = \frac{S_{\text{и}}}{S_{\text{min}}} , \quad (16)$$

$$\text{или} \quad n_{\text{р}}^{\text{с}} = n_{\text{и}}^{\text{с}} \cdot n_{\text{н}}^{\text{с}} . \quad (17)$$

Отношением толщины стенки S_{k} к расчетной толщине S_{p} с учетом показателя коррозии и коррозионной стойкости материала автором впервые определен ФЗТ $n_{\text{k}}^{\text{с}}$ и ПЗТ $n_{\text{р}}^{\text{с}}$ от изготовления до разрушения по формулам

$$n_{\text{k}}^{\text{с}} = q \frac{S_{\text{k}}}{S_{\text{p}}} \quad (18) \quad \text{и} \quad n_{\text{р}}^{\text{с}} = q \frac{S_{\text{и}}}{S_{\text{min}}} . \quad (19)$$

где q – количественный показатель коррозии и коррозионной стойкости материала, регламентированный ГОСТ 9.908-85 «Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости», который зависит от химического состава и структуры металла, состава среды, температуры, гидро - и аэродинамических условий, вида и величины механических напряжений, а так же от типа коррозии (сплошная, язвенная, межкристаллитная, коррозионное растрескивание и усталость).

Функционал долговечности показывает, что запас прочности является величиной переменной и снижается по мере износа, появления дефектов и деградации материала. Он оказывает влияние на снижение несущей способности и увеличения напряжений в элементах СиА. Снижение запаса прочности на протяжении всего жизненного цикла СиА в свою очередь вызвано снижением запаса толщины стенки. Поскольку составляющие, входящие в условие (3), определены по толщине стенки формулами (18 и 19), по мнению

автора в расчетах наряду с запасами прочности могут использоваться запасы толщины стенок.

По исходным, фактическим и предельным запасам прочности автором разработана классификация составляющих ресурса и параметров для его оценки на различных этапах жизненного цикла СиА в зависимости от вида ТС, представленная в таблице 3.

Таблица 3. Классификация составляющих ресурса и расчетных параметров для его оценки на различных этапах жизненного цикла СиА

Этап жизненного цикла	Вид технического состояния		Расчетные параметры стенки			Параметры ресурса	
	Наименование	Сокращение	Толщина стенки	Запас толщины	Запас прочности	Наименование	Обозначение
Проектирование (изготовление)	Исходное ТС	ИТС	$S_{и}$	$n_{и}^s$	$n_{и}$	Проектный (исходный)	$T_{и}$
Эксплуатация	Фактическое ТС	ФТС	S_k	n_k^s	n_k	Расчетный (текущий)	T_k
Прекращение эксплуатации вследствие износа	Предельное ТС	ПТС	S_p	$n_{н}^s$	$n_{н}$	Остаточный	T_o

На основе классификации получено условие снижения ресурса согласно патенту Рос. Федерации № 2436103 в зависимости от снижения запасов прочности при достижении ИЗТ, ФЗТ и ПЗТ стенки

$$T_{и} \geq T_k \geq T_{k+1} \geq T_o = f(n_{и} \geq n_k \geq n_{k+1} \geq n_o \geq n_{н}). \quad (20)$$

На каждом этапе параметры ТС оцениваются толщинами стенок, качеством сварных швов, наличием дефектов, поэтому ресурс СиА, состоящего от 1 до m элементов, включая зоны сопряжения их между собой, определен по наиболее слабому из них по формуле

$$T = \min(T_1; T_2; \dots T_m). \quad (21)$$

Соответственно, при общем количестве рассчитываемых элементов от 1 до m , запас прочности СиА в целом задается минимальной величиной n_{min} наиболее слабого из них

$$n_{min} = \min(n_{1...m}) \geq 1,0. \quad (22)$$

Для расчета фиксированных величин запасов прочности, примененных в формулах (14÷19), в условии (20) и в классификации (таблица 3) автором предложена функциональная зависимость оценки ресурса от запасов прочности и вида ТС, которая имеет вид

$$(T_{и}, T_k, T_o) = f(n_{и}, n_k, n_o). \quad (23)$$

При ЭПБ ресурс может назначаться ниже, чем это определено функцией (23) на величину

$$T_{и} = \min((T_{и}, T_k, T_o) - T_{сн}), \quad (24)$$

где: $T_{сн}$ – снижение ресурса, определяемое проектировщиком или экспертной организацией по результатам дополнительных исследований или по экспертной оценке параметров, которые не представляется возможным подтвердить

расчетами прочности и ресурса заменяемых или усиливаемых элементов СиА.

Реализация алгоритма поэтапного прогнозирования ресурса СиА, схема которого представлена на рис. 3, осуществлена с помощью функциональной зависимости (23) оценки ресурса по запасам прочности.

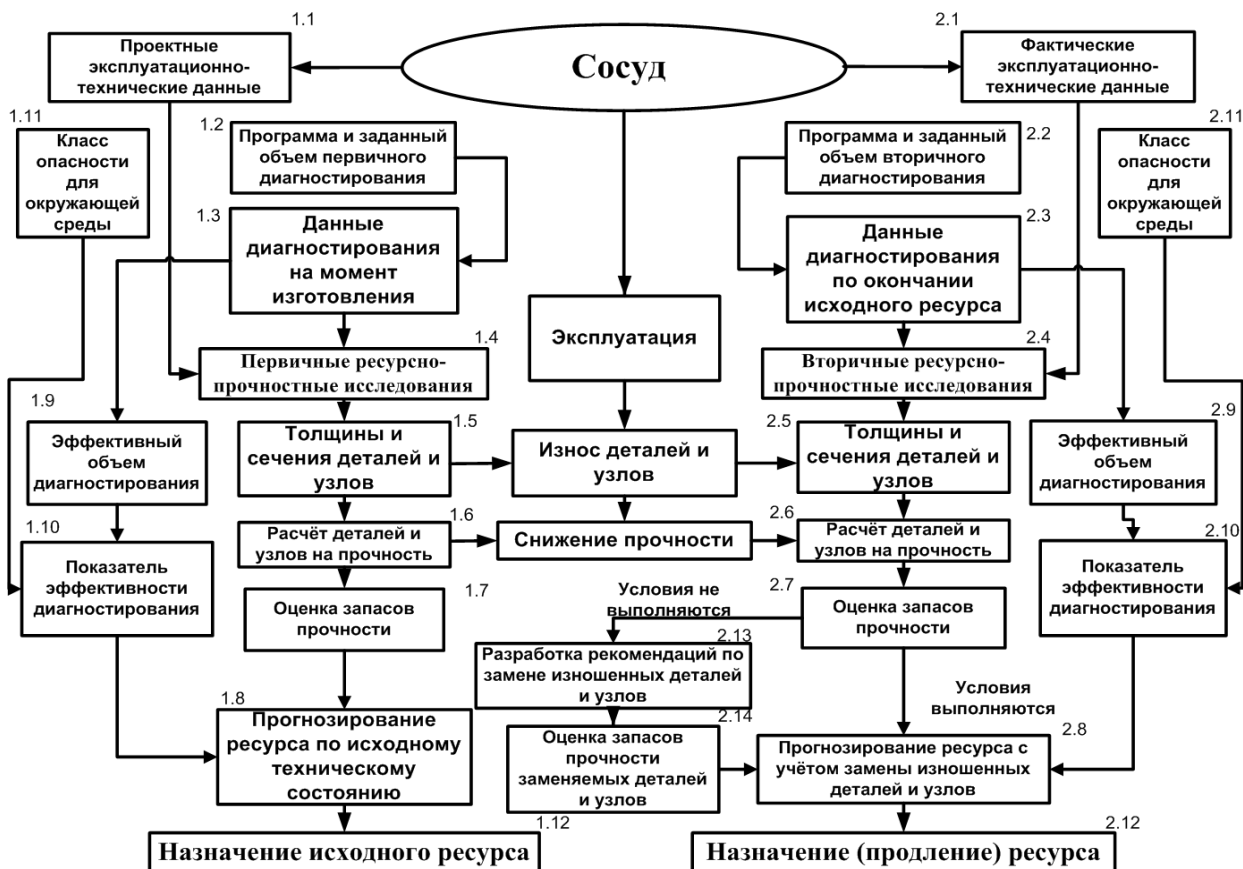


Рис. 3. Структурная схема алгоритма поэтапного прогнозирования ресурса СиА

Прогнозирование исходного ресурса осуществляется по проектным эксплуатационно-техническим данным. На момент изготовления определяется ИТС результатами первичного ТД и РПИ с учетом показателя эффективности и опасности разрушения СиА (блоки 1.1÷1.12). По окончании назначенного ресурса ФТС определяется с учетом показателя эффективности и опасности разрушения СиА (блоки 2.1÷2.12) по фактическим эксплуатационно-техническим данным на момент вторичного ТД и РПИ. По снижению толщин стенок (блоки 1.5 и 2.5) определяется их износ. Расчетами прочности (блоки 1.6 и 2.6) определяется снижение запасов толщины, запасов прочности и их близость к нормативным запасам. Если фактические запасы прочности близки к нормативным запасам (блоки 1.7 и 2.7), эксплуатацию прекращают. В процессе ТД выявляются дефекты, проведением РПИ определяется их опасность, прогнозируемое время до разрушения и необходимость ремонта или замены изношенных элементов СиА. По принятию решения о проведении их ремонта, усиления или замены (блоки 2.13 и 2.14) осуществляется прогнозирование ресурса с учетом замененных (усиленных) элементов (блок 2.8) и назначается продляемый ресурс. Закономерность перехода от ИТС к

ФТС и далее к ПТС, определенная условием (20), функцией (23) и алгоритмом (рис. 3), предложена в качестве модели прогнозирования ресурса, как отдельных элементов, так и всего СиА.

Прочностное резервирование, обеспечивающее безопасность эксплуатации при этом задано величиной запаса прочности стенок СиА.

В третьей главе рассмотрена модель прогнозирования ресурса СиА вследствие коррозионного износа его элементов, соприкасающихся с агрессивными средами.

Схема модели прогнозирования ресурса СиА на основе закономерности перехода от ИТС и ФТС к ПТС. показана на рис. 4. Для реализации модели рассмотрен переход от ИТС (прошлого) и ФТС (настоящего) к ПТС (будущему), чтобы определить возможность дальнейшей эксплуатации СиА. При изготовлении по результатам первичного ТД и РПИ по алгоритму (рис. 3) определяются ИТС и исходные запасы прочности на момент изготовления.

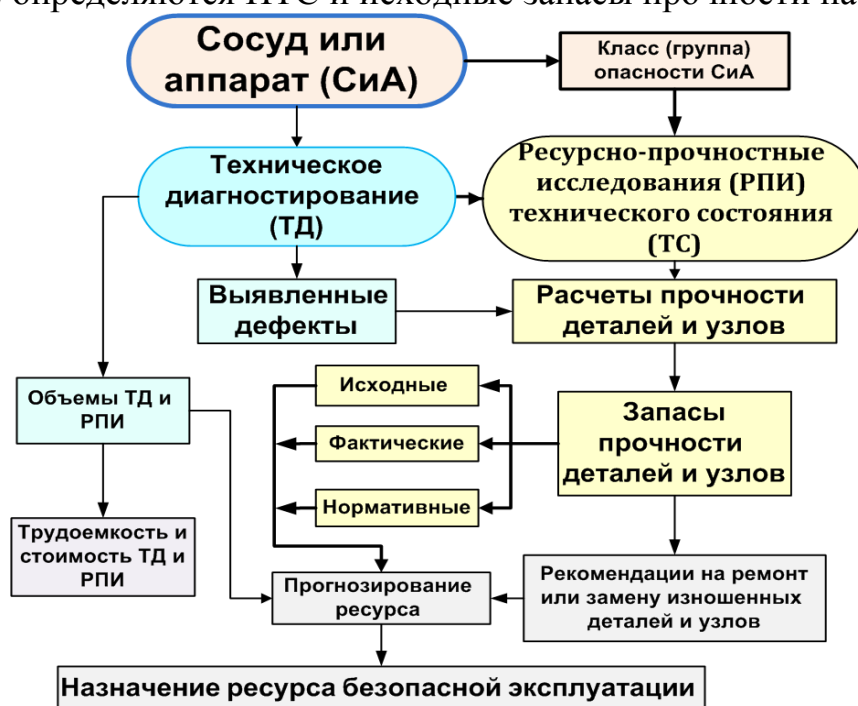


Рис. 4. Схема модели прогнозирования ресурса СиА на основе закономерности перехода от ИТС и ФТС к ПТС

По окончании назначенного ресурса вторичным ТД и РПИ устанавливаются параметры ФТС и рассчитываются фактические запасы прочности. Функция перехода к ПТС на момент окончания остаточного ресурса реализуется при минимально допустимых запасах прочности. Исследования показали, что фиксирован-

ных значений запасов прочности определяемых на моменты ТД, для прогнозирования ресурса недостаточно. Поэтому в работе сделана попытка применения величины снижения полного запаса прочности стенки за период от начала эксплуатации до достижения ПТС, которое определено разностью $\Delta n_{\text{и}} = n_{\text{и}} - n_{\text{н}}$. Разность $\Delta n_k = n_{\text{и}} - n_k$ показывает текущее снижение запаса прочности за период от начала эксплуатации до времени текущего ТД. Величины относительного снижения полного $\Delta n_{\text{и}}/n_{\text{н}}$ и текущего $\Delta n_k/n_k$ запасов прочности стенки приняты автором в качестве полной и текущей степени коррозионного износа

$$Z = \frac{n_{\text{и}} - n_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} \quad (25)$$

и

$$Z_k = \frac{n_{\text{и}} - n_k}{n_k}, \quad (26)$$

где k – порядковый номер ТД и РПИ, определяемый как $k=1 \dots i$.

Однако, формулы (25 и 26) показывают величину износа за прошедший период эксплуатации. Для определения запаса коррозионного износа, который сможет обеспечить безопасность СИА на последующий период эксплуатации, отношение $n_k/\Delta n_k$ принято в качестве запаса на износ, представленного формулой

$$K_k = \frac{n_k}{n_{\text{н}} - n_k}. \quad (27)$$

Величина K_k , определяемая формулой (27), показывает запас на износ стенки от ИТС до ПТС, то есть до достижения предельно допустимого запаса прочности, поэтому принята в качестве расчетной величины коэффициента безопасности, предложенного в работах Махутова Н.А.

Применив формулу (27) в качестве подкоренного выражения получена нелинейная квадратичная зависимость для прогнозирования полного ресурса СИА, представленная формулой

$$T_{\text{п}} = t_k \sqrt{\frac{n_k}{n_{\text{н}} - n_k}}, \quad (28)$$

которая впервые применена в патенте Рос. Федерации № 2454648.

По формуле (28) при нормативном сроке эксплуатации $t_{\text{н}} = 20$ лет и исходном запасе прочности $n_{\text{н}} = 2,0$ построена экспоненциальная зависимость

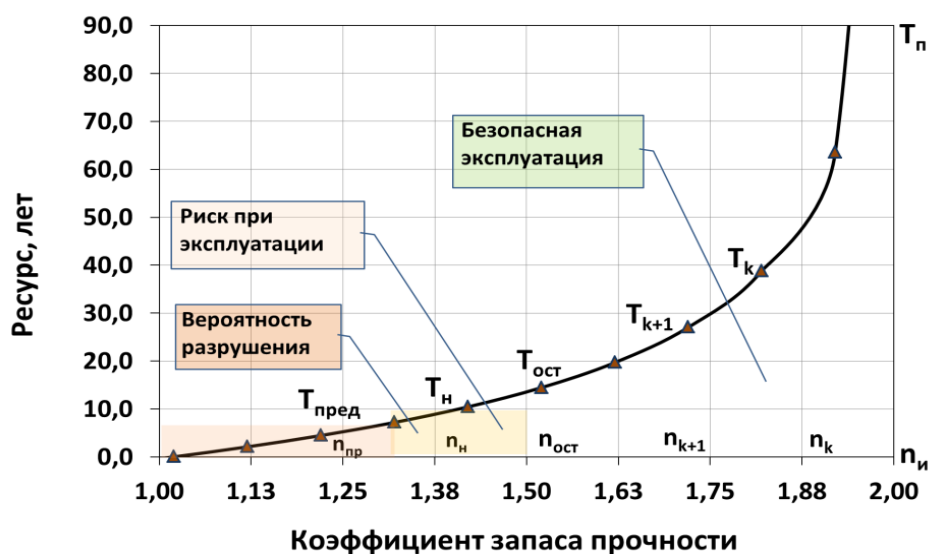


Рис. 5. Экспоненциальная зависимость ресурса от величины запаса прочности на различных отрезках жизненного цикла СИА

ресурса от запаса прочности на различных отрезках жизненного цикла СИА, представленная на рис. 5. Чтобы оценить опасность утонения стенки при эксплуатации СИА по расчетным значениям таблицы 2, в таблице 4 по формулам (26, 27 и 28) проведен расчет степени износа, коэффициента безопасности, и ресурса по запасам прочности стенки. Например, в строке № 4 таблиц 2 и 4 показана минимальная толщина стенки, которая обеспечит безопасность эксплуатации исследуемого сосуда, составляет 10 мм. В строке № 5 таблиц 2 и 4 показана расчетная толщина стенки, равная 7,9 мм, которая принята в качестве предельно допустимой при эксплуатации. По данным таблицы 4 построены зависимости, приведенные ниже. Зависимость степени износа от текущего запаса толщины стенки представлена на рис. 6.

Из графика видно, что степень износа увеличивается со снижением запаса толщины стенки. Соответственно, при эксплуатации достижение толщины, близкой к расчетной толщине, недопустимо из-за соображений без-

Таблица 4 - Расчет степени износа, коэффициента безопасности, и ресурса по запасам прочности стенки

№ п/п	Запас прочности стенки				Степень износа			Коэффи- циент безопас- ности	Ресурс, лет			
	Теку- ку- щий	Погрешность			Номи- нальная	Погреш- ность			Теку- ку- щий	Погрешность ресурса		
	n_k	n_{k+}	n_{k-}	%	Z_k	Z_{k+}	Z_{k-}	K_k	T_k	T_{k+}	T_{k-}	%
1	2,03	2,12	1,90	5,47	0,10	0,05	0,17	10,13	63,6	89,8	48,2	48,8
2	1,77	1,87	1,70	4,82	0,23	0,17	0,28	4,40	41,9	49,2	37,6	13,8
3	1,52	1,61	1,44	5,63	0,43	0,35	0,51	2,31	30,4	33,9	28,1	9,6
4	1,27	1,36	1,19	6,75	0,72	0,60	0,83	1,39	23,6	25,8	22,0	8,2
5	1,00	1,09	0,92	8,54	1,18	0,99	1,35	0,85	18,4	20,1	17,2	8,0
6	0,89	0,98	0,81	9,64	1,46	1,22	1,69	0,69	16,6	18,1	15,4	8,2
7	0,76	0,85	0,68	11,25	1,86	1,55	2,18	0,54	14,6	16,1	13,5	8,7
8	0,63	0,73	0,56	13,50	2,44	1,99	2,91	0,41	12,8	14,2	11,7	9,6

Погрешности оценки с учетом предельных отклонений $d_{s(-)}=0,4$ мм и $d_{s(+)}=0,15$ мм и ошибки измерения $D_k=0,6$ мм.

опасности СИА. Статистическая обработка экспериментальных данных проведена регрессионным анализом по методу наименьших квадратов. Получены полиномиальные зависимости при номинальных значениях, а также с учетом погрешностей и ошибки измерения. Ошибка расчетов составила не

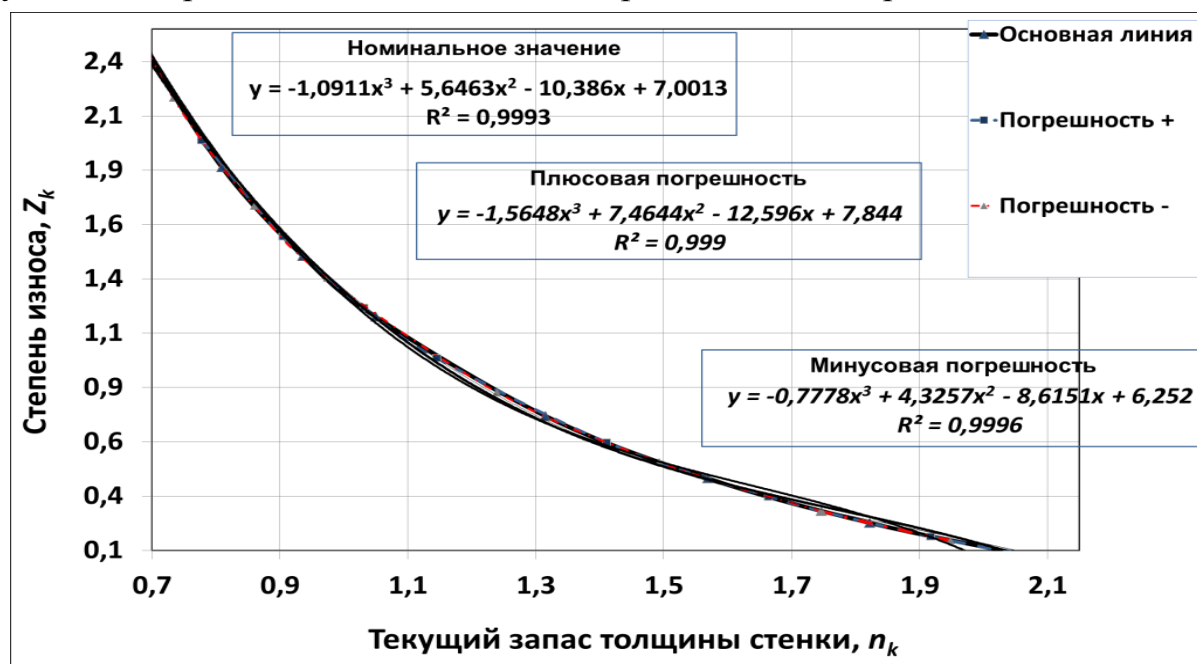


Рис. 6 - Зависимость степени износа от текущего запаса толщины стенки

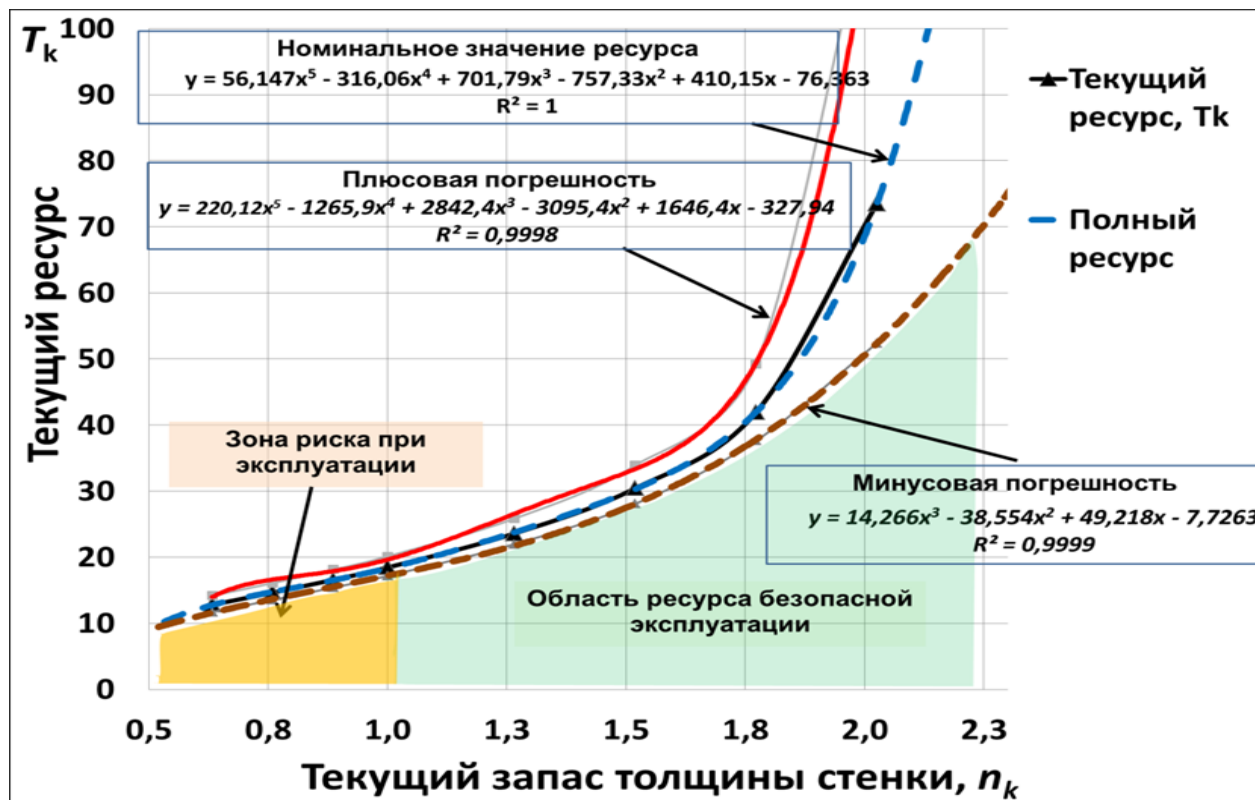
более 5%. Далее показан расчет погрешности по формуле

$$\delta_s = (S_{\text{и}} \pm d_s) - (S_k \pm D_k),$$

которая выражена как численными значениями, так и в процентном отношении.

В качестве примера зависимость ресурса от толщины стенки при ошибке измерения $D_k=0,6$ мм представлена на рис. 7.

Расчетные значения погрешностей и ошибок измерения показывают,



Предельные отклонения $d_{s(-)}=0,4$ мм и $d_{s(+)}=0,15$ мм.

Ошибка измерения $D_k=0,6$ мм.

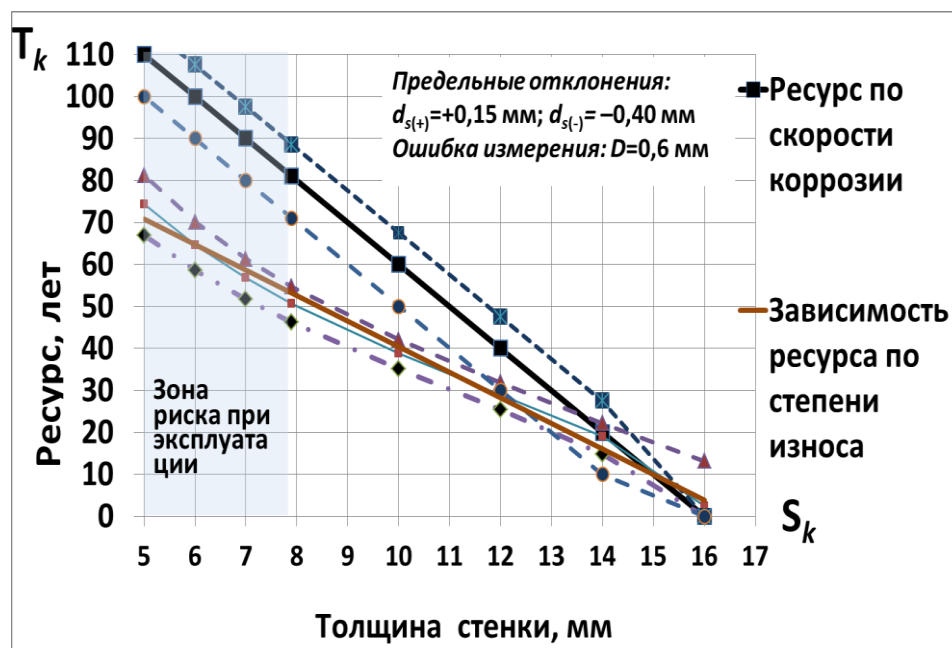
Рис. 7 - Зависимость ресурса от текущего запаса толщины стенки

что запас толщины стенки должен быть выше единицы, чтобы ФТС не оказалась ниже расчетной толщины. При толщине стенки равной 14 мм погрешности составили: по запасу толщины стенки 4,82 %; по степени износа 25,8%; по коэффициенту безопасности 28,63%, по ресурсу 13,82%.

При расчетной толщине стенки 7,9 мм погрешности составили: по запасу толщины стенки 8,54%, по степени износа 15,6%, по коэффициенту безопасности 16,16%, по ресурсу 8,0%. В итоге суммарная погрешность снижается с 48,8% до 8% при уменьшении толщины стенки с 16 мм до 7,9 мм. Область допустимых значений ресурса в зависимости от текущего запаса прочности, погрешностей и ошибки измерения принимается ниже кривой минусовой погрешности, приведенной на рис. 7.

Результатами расчетов и графиками зависимости ресурса от толщины стенки в соответствии с рис. 8, подтверждено, что погрешность оценки ресурса по степени износа ниже, чем погрешность оценки ресурса по скорости коррозии. В итоге, погрешность оценки ресурса по запасам толщины стенки в сравнении с величиной по скорости коррозии снизилась в 1,72 раза. Исследования показали, что время достижения допустимой глубины коррозионно-

го поражения во многих случаях определяет срок службы и долговечность СиА, поэтому, применение показателя коррозии и коррозионной стойкости



Ошибка измерения $D_k=0,6$ мм.

Рис. 8 - Зависимость ресурса от толщины стенки

материала взамен скорости коррозии снижает погрешности оценки ресурса как по запасам толщин стенок, так и по запасам прочности. В то же время, формула (28) не отражает влияния на ресурс объема контроля, степени дефектности и степени опасности разрушения СиА,

предусмотренные алгоритмом (рис. 3) и условием (20). Автором разработаны функции прогнозирования ресурса, в которых эти показатели учтены:

- полного ресурса на момент изготовления

$$T_{\text{п}} = f(n_{\text{н}}; n_{\text{из}}; W_{\text{эфф}}; \xi; \beta), \quad (31)$$

- текущего (расчетного) ресурса на период ТД в момент времени k , которое соответствует, например, данному моменту времени

$$T_k = f(n_{\text{н}}; n_k; W_{\text{эфф } k}; \xi_k; \beta_k), \quad (32)$$

- остаточного ресурса, определяемого по результатам первичного или последующего ТД на период времени $(k+1)$

$$T_o = f(n_{\text{н}}; n_{(k+1)}; W_{\text{эфф } (k+1)}; \xi_{(k+1)}; \beta_{(k+1)}), \quad (33)$$

где $n_{(k+1)}$ – запас (прочности, устойчивости и т.п.), заданный на период, который последует за следующим ТД; $W_{\text{эфф}}$ – эффективный объем ТД; ξ – коэффициент ответственности СиА; β – коэффициент дефектности, учитывающий наличие допустимых или недопустимых дефектов, обнаруженных при ТД и устраненных ремонтом при необходимости.

Коэффициент ответственности, предложенный в качестве аналога групп или классов, показывает степень опасности разрушения СиА

$$\xi = \gamma^{\ln(\delta)}, \quad (34)$$

где γ – доверительная вероятность оценки опасности или квантиль нормального распределения, выбирается из ряда: 0,80; 0,90; 0,95; 0,99;

δ – максимальная допустимая относительная ошибка расчета опасности выбирается из ряда: 0,05; 0,10; 0,15; 0,20. Прямая связь между коэффициентом ξ и группами (классами) опасности позволяет выбрать необходимые γ и

δ для СИА при расчете его ресурса. Выбор величин γ и δ рекомендован Методическими указаниями РД 03–421–03. В отличие от групп и классов, коэффициент ответственности СИА позволяет проводить аналитическую обработку результатов ТД. Формула (34) показывает, что большее значение величины ξ соответствует меньшей степени опасности разрушения СИА.

Общий объем контроля, выполненный при ТД, определяется формулой

$$V_{\Sigma} = \frac{N+L}{2} + V_A, \quad (35)$$

где N – объем ТД элементов; L – длины сварных швов.

Объем ТД элементов определен выражением

$$N = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{M'} \left[\frac{q_i}{T_i} \sum_{j=1}^{T'_i} (n_{ij} K_j) \right] \quad (36)$$

где n_{ij} – число элементов i -й группы, диагностированных j -м методом; T_i – число всех элементов i -ой группы; q_i – коэффициент относительной значимости элементов i -ой группы; T'_i – число методов, примененных при диагностировании элементов i -ой груп-

пы; M – число имеющихся групп элементов; M' – число диагностированных групп элементов; K_j – коэффициент достоверности j -го метода диагностирования.

Объем диагностирования сварных швов определен выражением

$$L = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \left[\frac{q_i}{l_i} \sum_{j=1}^{B_i} (l'_{ij} K_j) \right], \quad (37)$$

где l'_{ij} – длина всех сварных швов i -ой группы, диагностированных j -м методом (ультразвуковым, цветным, магнитопорошковым, радиографическим и т.п.); l_i – длина имеющихся сварных швов в i -ой группе; P – число групп сварных швов (кольцевых, продольных, и их перекрестий); B_i – число методов, примененных к i -ой группе. Объем диагностирования установлен зависимостью

$$V_A = \frac{\sum_{j=1}^r A_j \cdot K_j}{r} + V_p + V_{AEC}, \quad (38)$$

где A_j – относительная часть поверхности сосуда, диагностируемая j -м методом; r – число примененных методов, включающих наружный и внутренний визуальный контроль, замеры толщин стенок, металлографические и ме-

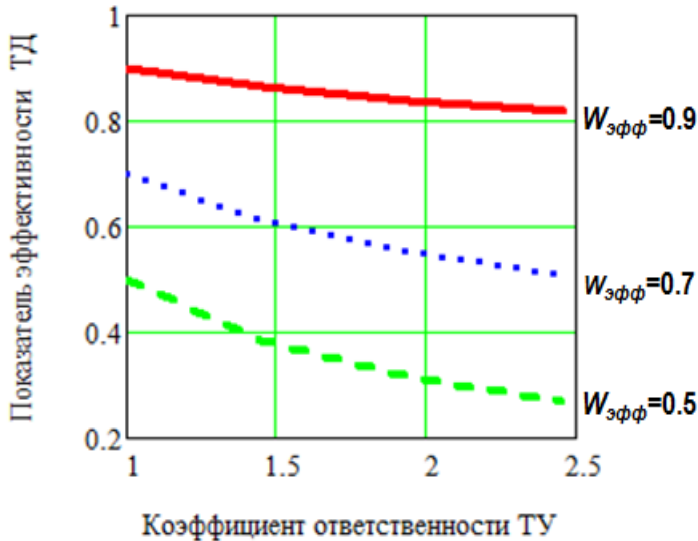


Рис. 9. Зависимость показателя эффективности ТД от коэффициента ответственности сосуда 1 группы

ханические исследования, измерение твердости и др.; V_P – объем контроля при проведении гидравлических и других испытаний; V_{AEC} – объем АЭК контроля.

На рис. 9 показана зависимость показателя эффективности ТД от коэффициента ответственности сосуда 1 группы. Сочетание двух и более методов, применяемых при ТД, увеличивает достоверность результатов ТД, и в этом смысле сумма по j неаддитивна, что рекомендуется учитывать при расчете N , L и V_A введением поправочных повышающих коэффициентов. Эффективный объем ТД определен формулой

$$W_{эфф} = V_{\varepsilon} \cdot \omega, \quad (39)$$

где V_{ε} – объем контроля, выполненный при ТД; ω – нормировочный параметр, зависящий от уровня технической оснащенности лаборатории неразрушающего контроля ($\omega = 0,5 \div 1,0$). Показатель эффективности ТД определен формулой

$$K_{\varepsilon} = W_{эфф}^{1+\ln \xi}. \quad (40)$$

Параметры достоверности оценки исходного и текущего запасов прочности, входящие в формулу представлены в виде функций

$$\lambda_{\text{и}} = f(\Delta n_{\sigma}^{\text{и}}; \Delta n_e^{\text{и}}; \Delta n_N^{\text{и}}; \Delta n_{\tau}^{\text{и}}; \Delta n_t^{\text{и}}), \quad (41)$$

$$\lambda_k = f(\Delta n_{\sigma}^k; \Delta n_e^k; \Delta n_N^k; \Delta n_{\tau}^k; \Delta n_t^k), \quad (42)$$

где: Δn_{σ} , Δn_e , Δn_N , Δn_{τ} , Δn_t – относительная ошибка оценки запасов прочности по напряжениям, деформациям, числу циклов, времени и температурам.

Например, Δn_{σ} зависит от фактических величин механических напряжений, допусков на толщину проката и погрешности замера толщин стенок

$$\Delta n_{\sigma}^k = f(\Delta \sigma, \Delta S).$$

С использованием формул (35÷42) функции (31, 32, 33) прогнозирования ресурса элементов и СиА могут быть реализованы при условии оценки степени износа или коэффициента безопасности на любом этапе от проектирования до достижения предельного состояния.

Используя коэффициент дефектности, степень опасности СиА в случае разрушения (34), эффективный объем ТД (39), параметр достоверности (42) и подставив их в формулу (28) в качестве понижающих коэффициентов, получена зависимость для расчета текущего ресурса

$$T_k = t_{\varepsilon} \cdot \sqrt{W_{эфф} \cdot \beta \cdot \left(\frac{n_k^{\lambda_k}}{n_{\text{и}}^{\lambda_{\text{и}}} - n_k^{\lambda_k}} \right)^{\xi}}. \quad (43)$$

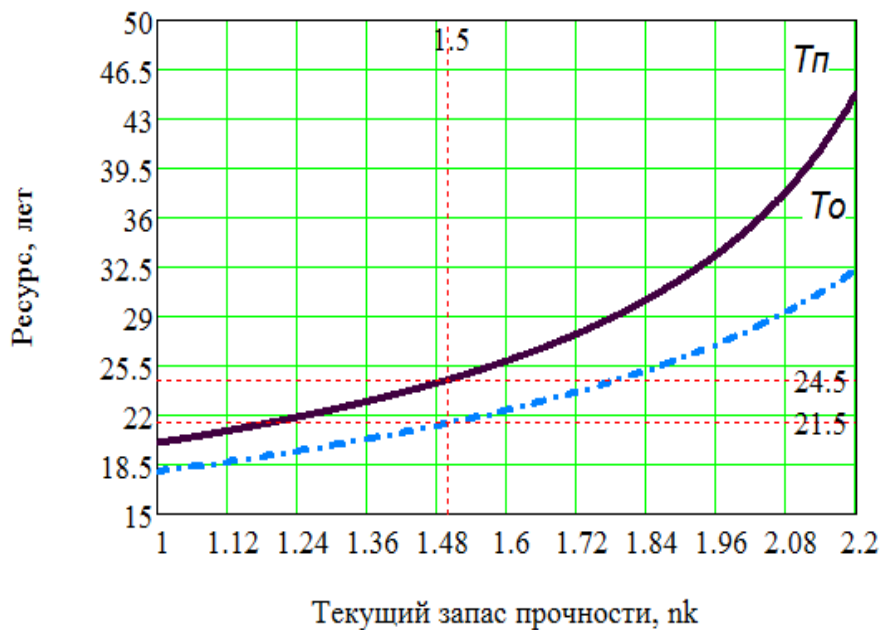
Зависимостью (43) определяется закономерность перехода от ИТС и ФТС к ПТС по степени коррозионного износа, дефектности, степени опасности разрушения, объемов ТД и предусматривается возможность оценки ресурса замененных и усиленных элементов СиА.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния эффективности ТД, достоверности оценки запасов прочности и степени опасности разрушения на ресурс сосудов и аппаратов.

С применением компьютерных экспериментов исследованы формулы (28 и 43) чтобы показать влияние на ресурс параметров, входящих в них и опре-

делить область их допустимых значений. Исследования проведены с применением численных методов. Для построения экспериментальных зависимостей, моделирования и анализа результатов исследований применен вычислительный прикладной пакет MathCAD, с помощью которого определены области допустимых значений степени коррозионного износа и построены зависимости ресурса от исходных и текущих запасов прочности.

На первом этапе исследована зависимость показателя эффективности ТД от коэффициента ответственности сосуда 1 группы. На рис. 10 приведены



$\xi=1,0$; $\beta=0,9$; $\lambda=0,9$; $W_{эфф}=0,9$ и $n_k=1,5$.

Рис. 10. Зависимость исходного (полного) и остаточного ресурса при снижении запаса прочности сосуда 1 группы

графики зависимостей исходного (полного) ресурса сосуда 1 группы (более опасного при эксплуатации) от текущих значений запасов прочности с использованием формулы (28).

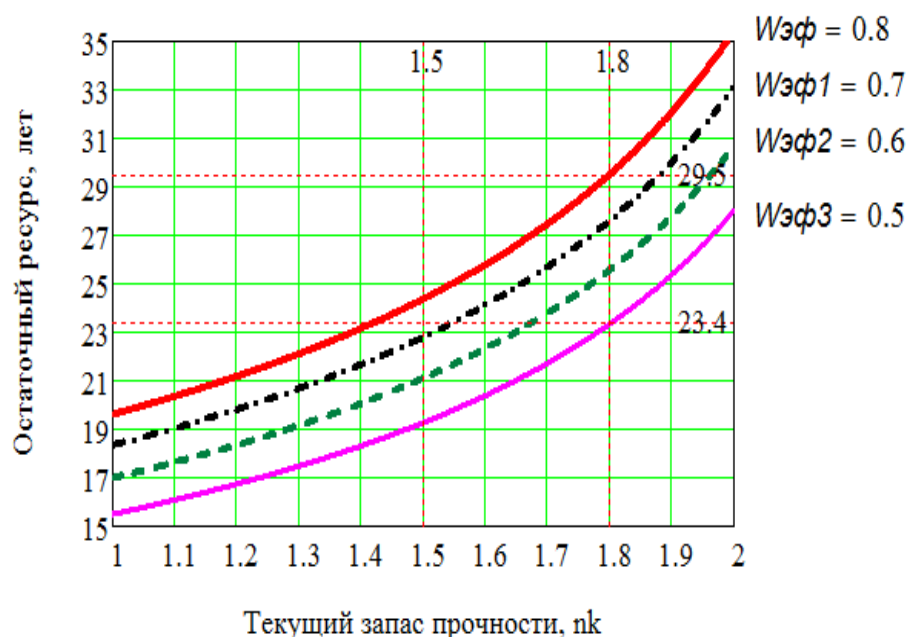
Остаточный ресурс определен с использованием формулы (43) при изменении параметров $\xi=1,0$; $\beta=0,9$; $\lambda=0,9$; $W_{эфф}=0,9$; которые снижают показате-

ли ресурса при одних и тех же запасах прочности. Определено соотношение полного и остаточного ресурса сосуда 1 группы при снижении текущего запаса прочности в пределах от 2,2 до 1,0. При этом $n_k=1$ принято на момент достижения предельно допустимого ресурса. Снижение ресурса происходит в зависимости от запаса прочности, например, при $n_k=1,5$ полный ресурс составляет 24,5 года, остаточный срок службы может быть принят не более 21,5 года, при этом снижение ресурса составляет 3,0 года. При достижении запаса прочности $n_k=2,0$ исходный ресурс составляет 34,6 года, остаточный срок службы может быть принят не более 27,8 года. Заданные запасы прочности, аппроксимированные с учетом показателей ξ , β , λ и $W_{эфф}$, позволили определить соотношение между полным и остаточным ресурсом, которое в частности составляет 6,8 года.

На рис. 11 показано влияние объема ТД на ресурс сосуда 1 группы. На графике видно, что снижение объема работ при ТД вызывает необходимость сокращения ресурса.

Например, при запаса прочности $n_k=1,8$ и эффективности ТД $W_{эфф}=0,8$ остаточный ресурс составляет 29,5 года, а при $W_{эфф}=0,5$ остаточный срок

службы может быть принят не более чем 23,4 года, при уменьшении объема

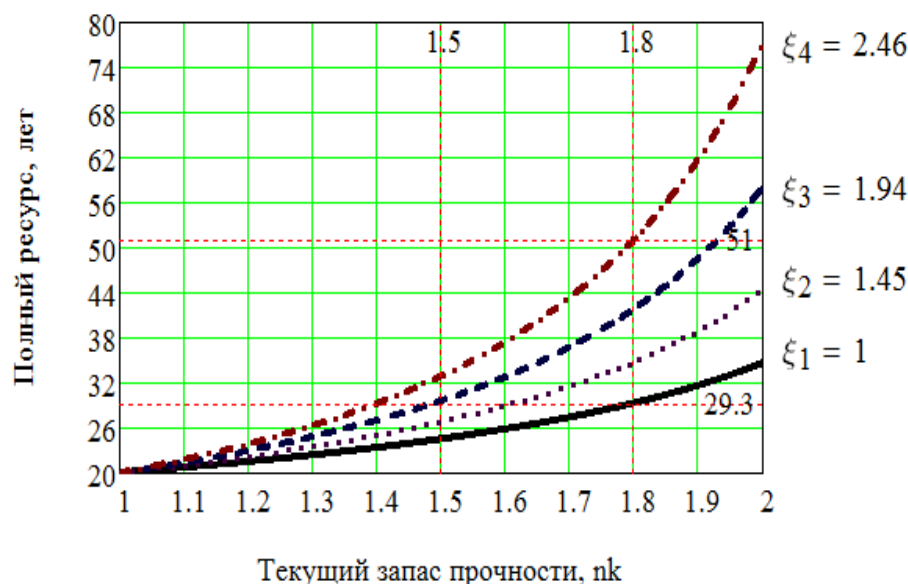


$\xi=1,0$; $\beta=0,9$; $\lambda=0,9$ и $n_k=1,5$.

Рис. 11. Влияние объема ТД на ресурс сосуда 1 группы

мер, исследованиями установлено, что при запасе прочности $n_k=1,8$ для сосуда 4 группы ($\xi_4=2,46$) исходный ресурс составляет 51 год, а для сосуда 1 группы ($\xi_1=1,0$) исходный ресурс составляет 29,3 года. При этом в зависимости от группы сосуда ресурс изменяется в пределах 21,7 года.

На рис. 13 показано соотношение остаточного ресурса сосудов 1,2,3 и



$\beta=0,9$; $\lambda=0,9$; $W=0,9$ и $n_n=1,5$.

Рис. 12. Соотношение полного ресурса сосудов 1,2,3 и 4 группы

сти (43) для сосудов 1, 2, 3 и 4 групп установлены интервалы допустимых

ТД на 0,3 снижение остаточного ресурса составляет 6,1 года.

На втором этапе проведено исследование ресурса сосудов 1, 2, 3 и 4 групп в зависимости от коэффициента ответственности.

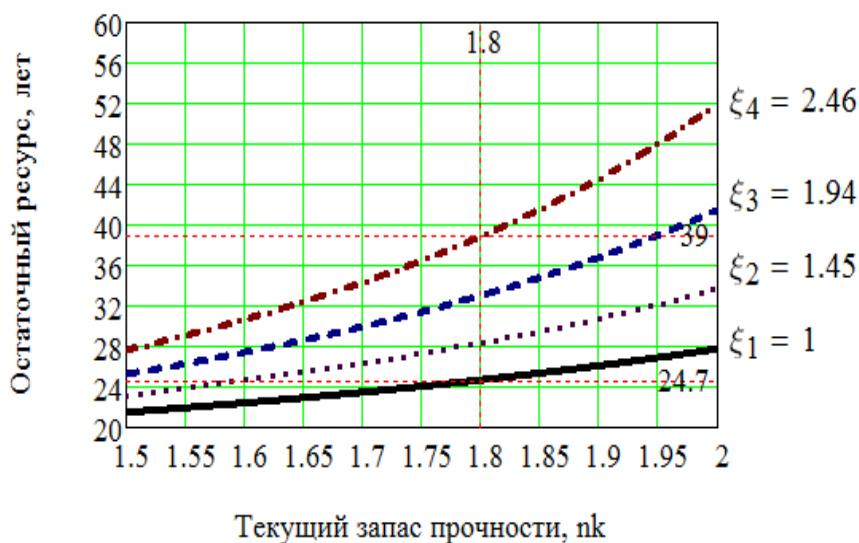
На рис. 12 показано соотношение исходного (полного) ресурса сосудов 1,2,3 и 4 группы. Напри-

мер, при запасе прочности $n_k=1,8$ для сосуда 4 группы ($\xi_4=2,46$) остаточный срок службы составляет 39 лет, а для сосуда 1 группы ($\xi_1=1,0$) остаточный срок службы составляет 24,7 года, соответственно, и прогнозируемый остаточный ресурс снижается на 14,3 года.

Проведенными исследованиями зависимо-

значений:

$\xi = 1 \div 2,46$; $\beta = 0,2 \dots 0,9$; $\lambda = 0,4 \dots 0,8$; $W_{эфф} = 0,3 \dots 0,9$; $n = 1,0 \dots 2,0$.



$\beta = 0,9$; $\lambda = 0,9$; $W = 0,9$ и $n_k = 1,5$.

Рис. 13. Соотношение остаточного ресурса сосудов 1,2,3 и 4 групп

но влияние на ресурс величин показателей ξ ; β ; λ и $W_{эфф}$ при снижении запасов прочности в пределах от двух до единицы.

В пятой главе представлены результаты разработки поточно - ориентированной технологии проведения ЭПБ СиА.

Комплекс работ по проведению ЭПБ разделен на три этапа: **Первый** направлен на оценку ФТС. **Второй** включает анализ закономерностей изменения параметров ТС, расчет режимов работы, исследование напряженно-деформированного состояния, оценку вероятности хрупкого разрушения, ползучести, циклической усталости элементов и выбор критериев предельных состояний. **Третий** включает расчетно – аналитические процедуры, РПИ, проводимые для продления ресурса ТУ и разработку заключений ЭПБ. Поточно-ориентированная технология направлена на их объединение в единый технологический процесс, включая ТД, РПИ, разработку рекомендаций на ремонт, прогнозирование ресурса и разработку заключений ЭПБ.

На рис. 14 показана классификационная схема определения показателя эффективности ТД, трудоемкости и стоимости СиА в зависимости от объема и методов его проведения.

За основные показатели приняты объемы ТД элементов, длины сварных швов и относительной поверхности типовых элементов. Трудоемкость ТД и РПИ для всего СиА составит

$$N_{CuA} = N \cdot t_N + L \cdot t_L + V_A \cdot t_{VA} + U \cdot t_p, \quad (42)$$

где t_N – норма времени на ТД типовых элементов; t_L – норма времени на ТД сварных швов; t_{VA} – норма времени на ТД единицы площади поверхности сосуда; U – трудоемкость и t_p – норма времени на проведение РПИ и ЭПБ.

Расчет численных значений искомых зависимостей получен последовательными приближениями. Исследования показали, что оценка качества ТД определяется коэффициентом дефектности, достоверностью оценки запасов прочности, эффективным объемом ТД и степенью опасности разрушения СиА. Исследованиями установлено

Нормы времени и себестоимость работ при использовании различных методов контроля, затраты на ТД определены по единым нормам времени и расценкам, учитывающим вспомогательное и подготовительно-заключительное время. Стоимость ТД, РПИ и ЭПБ предлагается определять формулой

$$C_{общ} = N \cdot t_N \cdot p_N + L \cdot t_L \cdot p_L + V_A \cdot t_{VA} \cdot p_{VA} + U \cdot t_p \cdot p_p + C_n, \quad (43)$$

где p_N – расценка на ТД типовых элементов; p_L – расценка на ТД сварных швов; p_{VA} – расценка и норма времени на ТД единицы площади поверхности сосуда, охватываемой например визуально – измерительным, акустико – эмиссионным, магнитноанизотропным и другими методами контроля; p_p – расценка на проведение РПИ и ЭПБ; C_n – накладные расходы на приборы, расходные материалы, включая амортизационные отчисления на оборудование и помещения.

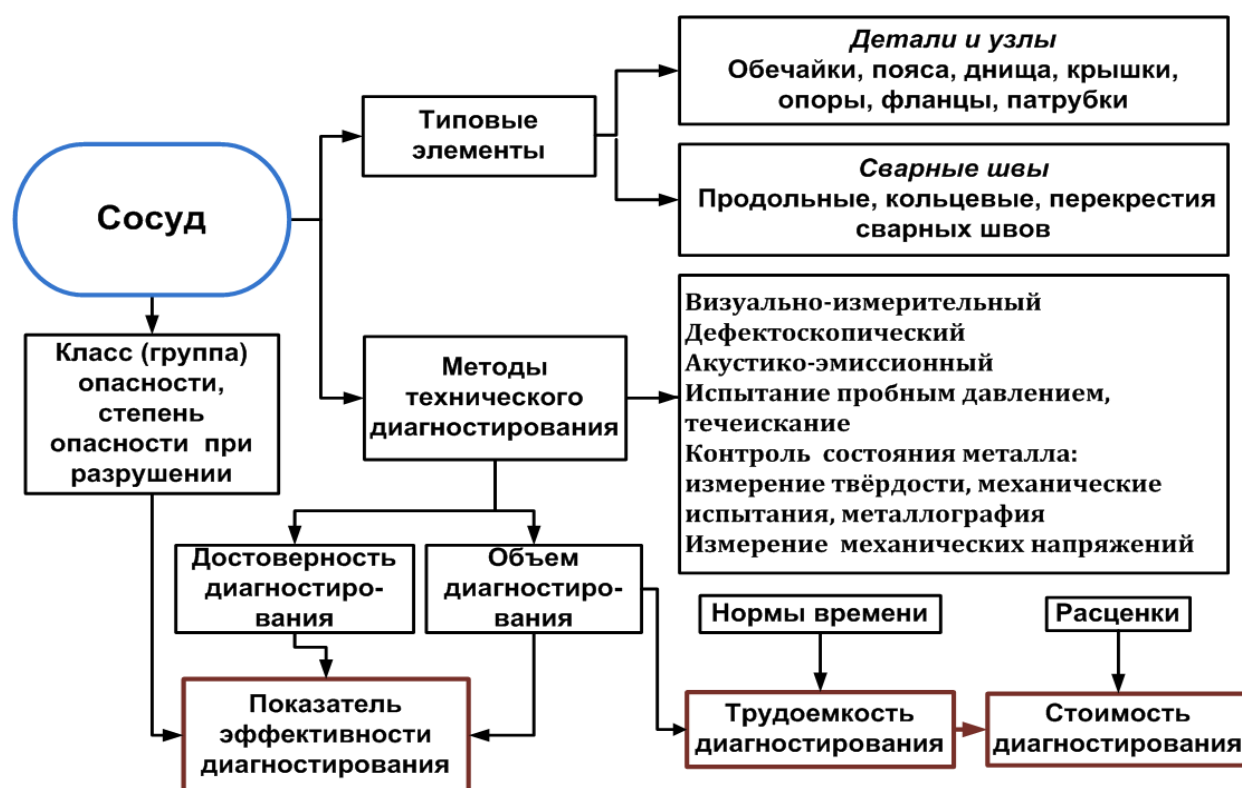


Рис. 14. Классификационная схема определения показателя эффективности ТД, трудоемкости и стоимости СиА в зависимости от объема и методов его проведения

Время, необходимое на проведение ТД, РПИ и ЭПБ самого сложного аппарата, определено формулой

$$Д_{ЭПБ} = \frac{N_{пз} \cdot (1 - K_d) + N_{max}}{m \cdot t_c \cdot n_c \cdot K_{исп}}, \quad (44)$$

где $N_{пз}$ – трудоемкость подготовительно заключительных операций; N_{max} – максимальная трудоемкость ЭПБ наиболее сложного СиА; K_d – коэффициент, учитывающий долю выполнения диагностических работ, проводимых в период подготовительного и заключительного времени ремонта (рекомендуемое значение $K_d = 0,15 - 0,20$); m – численный состав специалистов, занятых диагностированием установки, находящейся в ремонте; t_c – средняя продолжительность рабочей смены; n_c – число рабочих смен в сутки; $K_{исп}$ – коэффици-

ент использования диагностического оборудования в течение смены (рекомендуемое значение $K_{исп} = 0,8 \div 0,85$).

Количество дней простоя технологической установки при проведении ремонта и ЭПБ рассчитано суммой

$$D_{np} = D_p + D_{ЭПБ},$$

где D_p - число рабочих дней, отводимых на ремонт установки.

Формулами (42, 43 и 44) обоснованы нормы времени и трудоемкость проведения ТД, РПИ, ремонта и ЭПБ СиА технологических установок опасных производств.

В шестой главе представлен комплекс компьютерной обработки результатов диагностирования (КомКОРД) и ЭПБ различных типов СиА.

Проведение РПИ при ТД связано с массивом данных и вычислительных операций обработки результатов расчета прочности и ресурса, оформлением



Рис. 15. Структурная схема КомКОРД при экспертизе СиА

заклучений ЭПБ. Алгоритм прогнозирования проектного и остаточного ресурса СиА (рис. 3), маршрутная технология РПИ при ТД, изложенная в главе 5, и прикладной пакет Microsoft Office Excel позволили создать КомКОРД, структурная схема которого показана на рис. 15. Реализация модели поэтапного прогнозирования ресурса СиА, приведенной на рис. 4, включает выбор расчетных схем в зависимости от типа, конструктивного исполнения и количества элементов СиА. Построение КомКОРД по модульному принципу позволило осуще-

ствить гибкие связи между модулями, которые находятся в соответствующих операторах, выбирать соответствующие операторы и модули для ввода исходных данных, расчета прочности и получения данных по запасам прочности. С применением КомКОРД проводится анализ изношенности элемен-

тов по величинам запасов прочности, определяется необходимость их усиления или замены, поэлементно рассчитывается ресурс отдельно для каждого элемента или всего СиА и разрабатывается проект заключения ЭПБ. Формализованное описание конечного набора свойств и параметров, обуславливающих и характеризующих тот или иной вид повреждения, разрушения или отказа реализовано с использованием функций алгебры логики, предложенное Берманом А.Ф. и применено для обработки показанного множества данных в КомКОРД. Например, сосуд может быть аппаратом колонного типа, емкостью или теплообменником, поэтому выбор соответствующих модулей для различных конструктивных элементов, их размеров, характеристик материалов, результатов ТД осуществляется автоматически в зависимости от конструктивного исполнения СиА в целом. На рисунках 16÷21 в качестве примера показаны отдельные фрагменты карты исходных данных, расчета прочности и ресурса сосуда, разработанных с применением КомКОРД.

На рис. 16 показан фрагмент карты исходных данных, в которую зане-

ЭЛЕМЕНТЫ СОСУДА

ОБЕЧАЙКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ

Таблица 1.1

№ по схеме	Элемент сосуда	Внутренний диаметр, мм	Длина, мм	Толщина, мм	Марка стали
1	обечайка корпуса	2600	10012	8	ВСт3

ВЫПУКЛЫЕ ДНИЩА

Таблица 1.2

№ по схеме	Элемент сосуда	Длина частей, мм		Толщина, мм	Марка стали
		цилиндрической	выпуклой		
2	днище корпуса левое	60	650	16	ВСт3
3	днище корпуса правое	60	650	16	ВСт3

Листы, мм

Ширина	Длина
1500	6000

Данные о заменах → → → →

Р внутри	Колич. частей	Продольные, мм	Кольцевые, мм	Перекрестия, шт
0,04	14	20024	57177	28

Р внутри	Колич. частей	Продольные, мм	Кольцевые, мм	Перекрестия, шт
0,04	2	5320	8168	2
0,04	2	5320	8168	2

Рис.16. Фрагмент карты исходных данных СиА

сены рабочие параметры, размеры и материалы СиА. На рис. 17 показана

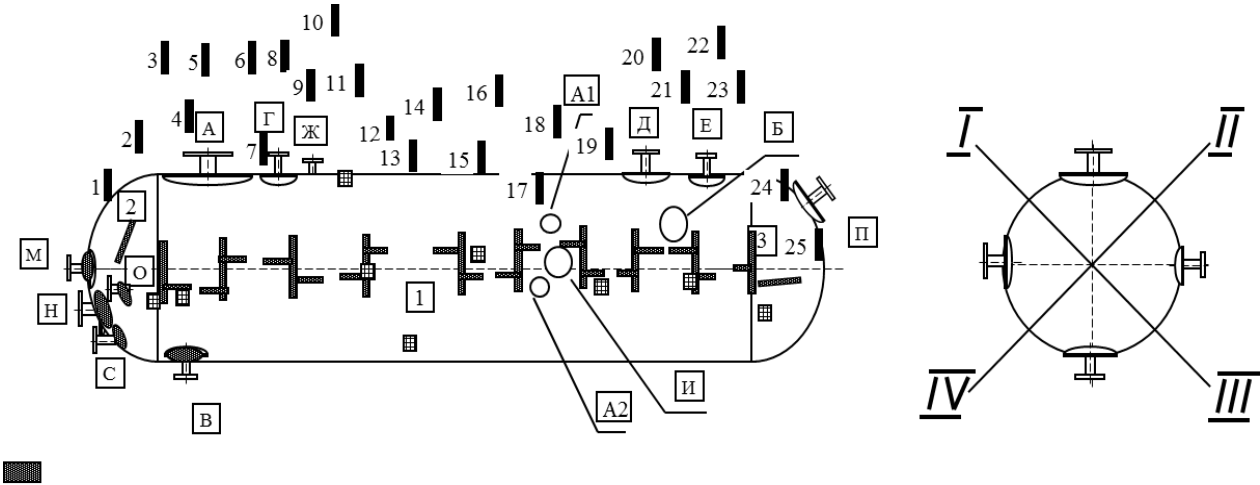


Рис. 17. Схема корпуса с элементами и сечениями, в которых проводится дефектоскопический контроль

схема корпуса с элементами и сечениями, в которых проводится дефектоскопический контроль, по данным которого разрабатываются заключение по

ультразвуковому, магнитопорошковому, рентгенографическому, капиллярному и другим методам контроля.

КомКОРД позволяет рассчитывать до 20 однотипных элементов и узлов типа обечаек и днищ корпусов на прочность и устойчивость от ветровых, сейсмических и опорных нагрузок, до 30 штуцерных узлов с расчетами запасов прочности и ресурса каждого элемента или узла, а затем для всего сосуда и аппарата. При открытии модулей исходные данные и результаты расчетов далее заносятся автоматически во все последующие открывающиеся модули.

На рис. 18 показан расчет прочности основных элементов корпуса.

2. Расчёт на прочность основных конструктивных элементов

2.1. Обечайки цилиндрические, нагруженные внутренним избыточным давлением

$$n_{(S)доп} = \frac{S_{толщ} - C}{S}; n_{(P)доп} = \frac{[P]}{P}; n_{(Pпр)доп} = \frac{[P]_{пр}}{P_{пр}}$$

дополнительные запасы прочности по толщине, расчётному давлению и давлению испытания, соответственно;

$$S = \max\{S_p; S_{мо}\}$$

- расчётная толщина стенки, мм;

где:

$S_{мо}$ - отбраковочная толщина стенки, мм;

$$S_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P}$$

- расчётная толщина стенки под действием внутреннего давления, мм;

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (S_{толщ} - C)}{D + (S_{толщ} - C)}$$

- допускаемое внутреннее избыточное давление для обечайки неподкреплённой кольцами жёсткости, МПа;

$[P]_{пр}$ - допускаемое пробное внутреннее избыточное давление, МПа. Определяется аналогично $[P]$, вместо $[\sigma]$ принимаем $[\sigma]_{пр}$;

$$[\sigma]_{пр} = \eta \frac{R_{e/20}}{n_{тпр}}$$

- допускаемое напряжение при испытании, МПа;

φ - коэффициент прочности кольцевого и продольного сварных швов;

$P_{пр}$ - давление пробное, МПа;

$n_{тпр} = 1,1$ - коэффициент запаса прочности по пределу текучести при испытании.

Исходные данные и результаты вычислений приведены в таблице 2.1.

1.1

Таблица 2.1

Элементы сосуда	D, мм	S _{толщ} , мм	P _p , МПа	P, МПа	C, мм	φ	S _p , мм	S _{мо} , мм	S, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
обечайка корпуса	2600	5,6	0,04	0,04	0,68	0,9	0,4	4,0	4,0

Продолжение таблицы 2.1

Элементы сосуда	[σ], МПа	[σ] ₂₀ , МПа	[P], МПа	R _{e20} , МПа	[σ] _{пр} , МПа	P _{пр} , МПа	[P] _{пр} , МПа	n _(S) доп	n _(P) доп	n _(Pпр) доп
1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
обечайка корпуса	151,8	154,0	0,5	250,0	227,3	0,1	0,8	1,2	12,9	7,7

Рис. 18. Модуль расчета прочности элементов корпуса СиА

На рис. 19 показан модуль расчета на сопротивление хрупкому разрушению зоны врезки штуцеров. Результаты расчета приведены в таблице 4.1 на рис. 19.

4. Расчёт на сопротивление хрупкому разрушению в зоне штуцеров

n_x и $n_{x,пр}$ - дополнительные запасы прочности по критерию хрупкой прочности при рабочих условиях и условиях испытания, соответственно;

$$n_x = \frac{[K_1]}{K_1}; \quad n_{x,пр} = \frac{[K_1]_{пр}}{K_{1пр}}; \quad [3, \text{ с. 71}]$$

K_1 и $K_{1пр}$ - расчетные коэффициенты интенсивности напряжений при рабочих условиях и условиях испытания, соответственно, МПа·м^{1/2};

$$[13, \text{ с. 107}]$$

$$K_1 = \phi \cdot (0,7 \cdot \sigma_p + 0,45 \cdot \sigma_q) \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{толщ}} - C}{1000}}; \quad K_{1пр} = \phi \cdot (0,7 \cdot \sigma_{p,пр} + 0,45 \cdot \sigma_{q,пр}) \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{толщ}} - C}{1000}};$$

σ_p и $\sigma_{p(пр)}$ - составляющие растягивающих напряжений при рабочих условиях и условиях испытания, соответственно для цилиндрических обечаек и выпуклых днищ -

$$[6, \text{ с. 6}]$$

$$\sigma_p = \frac{P}{2\phi} \left(\frac{D}{(S_{\text{толщ}} - C)} + 1 \right); \quad \sigma_{p,пр} = \frac{P_{пр}}{2\phi} \left(\frac{D}{(S_{\text{толщ}} - C)} + 1 \right);$$

σ_q и $\sigma_{q(пр)}$ - составляющие изгибных напряжений при рабочих условиях и условиях испытания, соответственно, МПа; $\sigma_q = \sigma_{q(пр)} = 0$;

$$[13]$$

$[K_1]_1$ и $[K_1]_{пр}$ - допускаемые коэффициенты интенсивности напряжений при рабочих условиях и условиях испытания, соответственно, МПа·м^{1/2};

$$[13, \text{ с. 98}]$$

$$[K_1]_1 = 13 + 18 \cdot e^{0,02(t_{\min} - t_k)}; \quad [K_1]_{пр} = 17 + 24 \cdot e^{0,018(t_{пр} - t_k)};$$

$t_{пр}$ - температура воды при гидроиспытании, °C; $t_{пр} = 10,0$ °C;

t_k - критическая температура хрупкости материала, °C; $[13, \text{ с. 100}]$

$t_{\min}$ - минимальная температура рабочей среды, °C;

ϕ - коэффициент, учитывающий влияние концентрации напряжений в элементе для зон отверстий при выполнении условия $\frac{2 \cdot S_{\text{толщ}}}{D} \leq 0,8$; $\phi = \sqrt{1 + 5 \cdot (K_\sigma - 1) \cdot e^{\left(\frac{0,86 \cdot (S_{\text{толщ}} - C)}{R_n} \right)}}$; $[13, \text{ с. 107}]$

K_σ - теоретический коэффициент концентрации напряжений; $[13, \text{ с. 107}]$

$R_n = d_n/2$ - наружный радиус патрубка, мм.

Исходные данные и результаты вычислений приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Обозначение штуцера	S_{1T} , мм	d_n , мм	$t_{\min}$, °C	t_k , °C	K_σ	σ_p , МПа	$\sigma_{p(пр)}$, МПа	ϕ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	6,3	480	55	10	1,56	11,76	29,39	1,9
B	5,9	273	55	10	1,63	11,76	29,39	2,0
B	6	219	55	10	1,50	11,76	29,39	1,8
Г	4,3	108	55	10	1,64	11,76	29,39	2,0
Д	5,1	159	55	10	1,65	11,76	29,39	2,0

Продолжение таблицы 4.1

Обозначение штуцера	K_1 , МПа·м ^{1/2}	$K_{1пр}$, МПа·м ^{1/2}	$[K_1]_1$, МПа·м ^{1/2}	$[K_1]_{пр}$, МПа·м ^{1/2}	n_x	$n_{x,пр}$
1	10	11	12	13	14	15
A	1,19	2,99	57,27	41,00	48,0	13,7
B	1,24	3,09	57,27	41,00	46,3	13,3
B	1,13	2,83	57,27	41,00	50,5	14,5
Г	1,23	3,07	57,27	41,00	46,6	13,3
Д	1,24	3,10	57,27	41,00	46,1	13,2

Условия сопротивления хрупкому разрушению выполняются.

Рис. 19. Модуль расчета на сопротивление хрупкому разрушению зоны врезки штуцеров

На рис. 20 показан модуль расчета объемов контроля и показателя эффективности ТД. Данные в таблицы по объемам и видам проведенного ТД

Таблица 6.2						
Методы контроля с полным охватом поверхности		Kj		Aj, %		
		Обозначение	Значение			
Нагружение давлением		K14	0,6	100,0		
Акустико - эмиссионный контроль		K13	0,7	0,0		

Таблица 6.3					
Методы контроля с полным или частичным охватом поверхности	Число приме- нённых методов, г	Kj		Aj, %	Aj · Kj , %
		Обозначение	Значе- ние		
Внутренний визуальный контроль	4	K6	0,7	80,0	56
Наружный визуальный контроль		K7	0,5	100,0	50
Измерение толщин стенок с наружной стороны		K8	0,7	80,0	56
Измерение толщин стенок с внутренней стороны		K9	0,9	0,0	0
Механические испытания		K12	0,8	0,0	0
Измерение твёрдости		K10	0,8	80,0	64

Таблица 6.4							
Штучные контролируемые элементы			Коэффициенты достоверности j-го метода диагностирования				
			Ультразвуковой	Гамма-графи ро-	Магнитопоро- о-	Цветной	
						снаружи	изнутри
Наименование	Обще е коли- чество , М	Количество диагностирован- ных элементов, М	Количество элементов, диагностированных i-ым методом				
			K1	K2	K3	K4	K5
			0,7	0,7	0,5	0,4	0,6
Перекрестия швов,	32	18	16	0	0	18	0
Патрубки, шт	15	8	0	0	0	8	0

Таблица 6.5							
Контролируемые типы сварных швов			Коэффициенты достоверности j-го метода диагностирования				
			Ультразвуково й	Гамма- графиро- вание	Магнитопоро- шковый	Цветной	
						снаружи	изнутри
Наименование	Обща я длина, li	Количество примененных методов, Vi	Длина сварных швов, диагностированных j-ым методом				
			K1	K2	K3	K4	K5
			0,7	0,7	0,5	0,4	0,6
Продольные швы, м	31	2	2,1	0	0	3,3	0
Кольцевые швы, м	74	2	5,8	0	0	5,8	0
Угловые швы патруб- ков, м	8	1	0	0	0	3,4	0

Таблица 6.6							
Объемы диагностирования, %							КЭ
VAEC	Vp	VA	VN	VL	VЭ	WЭфф	
0	60	116.50	39.42	11.66	142.04	88.774	0.272

Рис. 20. Модуль расчета объемов контроля и показателя эффективности ТД

приходят из соответствующих протоколов визуально – измерительного и де-

фектоскопического контроля, при этом рассчитывается количество элементов сосуда, длина сварных швов и количество их перекрестий в зависимости от его размеров. В таблице 6.6, приведенной на рис.20, выводится результат расчета объемов и показателя эффективности ТД в зависимости от коэффициента ответственности сосуда.

На рис. 21 показаны результаты расчета ресурса обечаек и штуцеров СиА. Параметры достоверности оценки запасов прочности λ_n и λ_k , входящие

7.1 Ресурс основных элементов сосуда												
Полный ресурс $T_n = T_{\Sigma} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_k}{n_n - n_k}\right)^{\xi}},$												
Текущий ресурс $T_k = T_{\Sigma} \cdot \sqrt{W_{\text{эфф}} \cdot \beta \cdot \left(\frac{n_k}{n_n - n_k}\right)^{\xi}}.$												
Исходные данные и результаты расчёта приведены в таблице .											Таблица 7.1	
S_n	$S_{\min}$	S_k	$W_{\text{эфф}}$	n_n	n_k^{Φ}	T_{Σ} , лет	T_n , лет	T_k , лет	q	ξ	β	Коэффициент безопасности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8,0	2,5	5,6	0,89	3,2	1,8	20,0	22,4	17,7	0,8	0,94	0,7	1,25
16,0	2,5	13,4	0,89	6,4	4,3	20,0	27,9	22,0	0,8	0,94	0,7	1,95
16,0	2,5	13,1	0,89	6,4	4,2	20,0	27,0	22,0	0,8	0,94	0,7	1,83
7.2 Ресурс штуцеров сосуда												
Исходные данные и результаты расчёта приведены в таблице 7.2.											Таблица 7.2	
S_n	$S_{\min}$	S_k	$W_{\text{эфф}}$	n_n	n_k^{Φ}	T_{Σ} , лет	T_n , лет	T_k , лет	q	ξ	β	Коэффициент безопасности
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
8,0	3,000	6,3	0,89	2,7	1,7	20,0	25,7	20,3	0,8	0,94	0,7	1,65
10,0	3,000	5,9	0,89	3,3	1,6	20,0	19,0	15,0	0,8	0,94	0,7	0,90
8,0	2,500	6,0	0,89	3,2	1,9	20,0	24,2	19,1	0,8	0,94	0,7	1,46
5,0	2,000	4,3	0,89	2,5	1,7	20,0	29,0	22,9	0,8	0,94	0,7	2,11
6,0	2,500	5,1	0,89	2,4	1,6	20,0	28,5	22,5	0,8	0,94	0,7	2,03

Рис. 21. Результаты расчета ресурса обечаек корпуса и штуцеров СиА

в формулу (43) не учитывались.

Как показано на рисунках (19÷21), в модулях расчета вначале приведены расчетные формулы и порядок расчета, а в таблицы автоматически заносятся исходные данные и результаты автоматизированного расчета прочности по элементам СиА. Подключением соответствующих модулей проводятся расчеты прочности и запасы по опорным нагрузкам в зависимости от пространственного положения СиА, по циклическим и малоцикловым нагрузкам, напряженному состоянию зон врезки штуцеров. Если в результате расчета запасы прочности из-за износа элементов окажутся ниже нормативных, то подключается модуль расчета прочности с учетом замены изношенных эле-

ментов. Проект заключения ЭПБ так же выполненный в виде отдельного модуля, в который по желанию оператора могут вноситься корректировки, дополнительные данные и в итоге представляет единый пакет документов, разработанный в соответствии с требованиями по ЭПБ технических устройств опасных производств.

В отличие от традиционных компьютерных программ, направленных только на выдачу конечного результата расчета, КомКОРД дает возможность визуализации хода расчёта, его результатов и анализа ситуации при изменении эксплуатационных и конструктивных параметров. Гибкая система построения расчетных модулей и их автоматическое подключение в зависимости от типа СиА, количества и типа входящих в него элементов (рис. 14), в зависимости от его конструктивных особенностей (наличия укрепляющих элементов) сокращает время проведения РПИ и разработки проекта заключения ЭПБ. В КомКОРД применены расчеты прочности по ГОСТ Р 52857.1-2007÷ ГОСТ Р 52857.12-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сборник стандартов». В модуле расчета хрупкого разрушения применены «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. (ПНАЭ Г-7-002-86). // Госатомэнергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.».

В период с 2002 по 2011 годы КомКОРД применен при ТД и РПИ 3677 сосудов и аппаратов технологических установок. Его использование позволило снизить трудоемкость выполнения работ по РПИ при ТД и сократить сроки подготовки рекомендаций на ремонт СиА примерно в 5 раз, что особенно важно в период остановочных ремонтов технологических установок. Например, обработка результатов ТД, расчеты прочности и ресурса, разработка рекомендаций по замене изношенных элементов СиА и разработка заключения ЭПБ типового сосуда объемом 500 м³, составила от одного до трех рабочих дней.

Результаты РПИ показали, что СиА технологических установок нефтехимических производств имеют различные запасы прочности, исключая возможность одновременной замены устаревшего оборудования. Метод прогнозирования ресурса и КомКОРД могут найти применение для обеспечения равнопрочности элементов СиА при проектировании путем определения номинальных толщин стенок и сечений.

На рис. 22 показана структурная схема автоматизированной системы ЭПБ СиА предприятия, которая включает базу данных с результатами ЭПБ сосудов, теплообменного оборудования, аппаратов колонного типа и резервуаров.

Применение КомКОРД совместно с автоматизированными рабочими местами, разработанными в рамках комплексной информационной системы «Галактика», внедренной в ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» и реализация автоматизированной системы промышленной безопасности «Надзор за состоянием оборудования. Диагностирование и контроль технического состояния. Контроль промышленной безопасности», снижает трудо-



Рис. 22. Структурная схема автоматизированной системы промышленной безопасности СИА предприятия

емкость проведения ЭПБ, время простоев оборудования в ремонте и повышает безопасность эксплуатации опасных производственных объектов.

Основные результаты и выводы по работе

В работе представлена концепция прогнозирования ресурса с использованием многокритериальной системы оценки ресурса, разработанная в соответствии с требованиями промышленной безопасности СИА опасных производств, ее теоретическое и экспериментальное обоснование.

Основные научные и практические результаты состоят в следующем:

1. Разработан метод прогнозирования ресурса, применимый на протяжении всего жизненного цикла СИА, основанный на закономерности перехода от ИТС и ФТС к ПТС по степени коррозионного износа, степени дефектности и степени опасности разрушения, с учетом объемов ТД. Метод дает возможность определять прочностной резерв элементов, а по наиболее слабому из них назначать ресурс СИА. Исследована область допустимых значений оценки ресурса при изменении запасов прочности, объемов ТД и степени опасности разрушения СИА.

2. В качестве характеристики для определения ресурса приняты запасы прочности от различных видов нагружения, воздействующих на элементы СИА при изменении толщин стенок элементов, подверженных коррозии, износу, усталости, ползучести, показатель коррозии и коррозионной стойкости материала. Нормируемые запасы прочности использованы в качестве пре-

дельно допустимых запасов, обеспечивающих безопасную эксплуатацию СиА.

3. Установлено, что для прогнозирования ресурса, фиксированных значения запасов прочности недостаточно. Принятое относительное снижение запасов прочности показывает степень коррозионного износа за прошедший период эксплуатации. Для прогнозирования ресурса по коррозионному износу, принята величина, обратная степени износа, показывающая коэффициент безопасности на последующий период эксплуатации.

4. Разработан комплекс компьютерной обработки результатов ТД, проведения РПИ и прогнозирования ресурса (КомКОРД) по коррозионной стойкости материала, запасам толщины стенок и запасам прочности, коррозионному износу, показателю эффективности ТД и степени опасности разрушения СиА. Автоматизированная обработка результатов ТД и проведения РПИ служит для повышения точности прогнозирования ресурса по проектным и фактическим эксплуатационным параметрам с учетом степени коррозионного износа, дефектности, показателя эффективности ТД и степени опасности разрушения как отдельных элементов, узлов и деталей, так и всего СиА.

5. Поточно-ориентированная технология, направленная на объединение в единый технологический процесс ТД, РПИ и ЭПБ, включает разработку рекомендаций на ремонт, прогнозирование ресурса и разработку заключений ЭПБ. Обоснованы единые технологические требования к РПИ при ТД и прогнозированию ресурса СиА различных типов конструктивного исполнения и различного назначения: емкостей теплообменников, аппаратов колонного типа и резервуаров, отработавших свой нормативный срок.

6. Применением показателя эффективности ТД установлена зависимость прогнозируемого ресурса от объема проведения ТД элементов, сварных швов, визуально – измерительного контроля поверхностей, замеров толщин стенок, объемов исследования металлографии, механических характеристик материалов и степени опасности разрушения СиА. Показатель эффективности ТД учитывался при оценке ресурса сосудов и аппаратов технологических установок нефтехимических производств.

7. Результаты научной работы на протяжении 9 лет использованы при экспертизе 3677 сосудов, аппаратов и вертикальных цилиндрических резервуаров технологических установок ОАО «Ангарская нефтехимическая компания», в том числе: Завода масел, Товарно–сырьевого производства, Нефтеперерабатывающего и Химического заводов, Завода катализаторов и органического синтеза и ОАО «Ангарский завод полимеров» г. Ангарск. Годовой экономический эффект при его использовании составил 2582994 рубля.

8. Предложенный метод прогнозирования ресурса и КомКОРД дает возможность при проектировании СиА на заданный заказчиком ресурс рассчитывать номинальные толщины стенок и сечений элементов, узлов, а также в зависимости от ресурса определять стоимость СиА.

9. Метод прогнозирования ресурса в сочетании с КомКОРД применим для обеспечения равнопрочности при проектировании путем определения номинальных толщин стенок и сечений элементов СиА.

10. Совместное применение КомКОРД и автоматизированных рабочих мест: «Надзор за состоянием оборудования. Диагностирование и контроль технического состояния. Контроль промышленной безопасности», который разработан в рамках комплексной информационной системы «Галактика», внедренной в ОАО «Ангарская нефтехимическая компания» повышает оперативность ремонта СиА. Реализация автоматизированной системы промышленной безопасности предприятия сокращает трудоемкость ЭПБ и время простоев оборудования в ремонте.

11. Создана фундаментальная основа для разработки методик, направленных на обеспечение надежности и промышленной безопасности не только СиА, но и других ТУ, в том числе котлов, трубопроводов и резервуаров опасных производств.

12. Дальнейшее развитие метода, рассмотренного на примере прогнозирования ресурса СиА, применимо для создания равнопрочных конструкций при проектировании не только отдельных ТУ, но и позволит создавать равнопрочное оборудование для технологических установок и комплексов опасных производств.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:

Статьи в периодических изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК РФ

1. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Оценка эффективности диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 10. С. 43–46.

2. Черепанов А.П., Колмаков В.П., Порошин Ю.В. и др. Комплекс компьютерной обработки результатов технического диагностирования // Безопасность труда в промышленности. 2010. № 7. С. 59–63.

3. Черепанов А.П. Выбор показателей для оценки полного расчетного и остаточного ресурса технических устройств // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 10. С. 43.

4. Черепанов, А. П. Технология прогнозирования ресурса технических устройств на основе технического диагностирования и ресурсно–прочностных исследований // Технология машиностроения. – 2011. – № 2. – С. 58–62. – Библиогр.: с. 62 (4 назв.).

5. Черепанов А.П., Колмаков В.П. Современные методы прогнозирования ресурса технических устройств и их сравнительный анализ // Безопасность труда в промышленности. № 6. 2011.– С. 42–48.

6. Черепанов А.П., Колмаков В.П. Сравнительный анализ методов для прогнозирования ресурса технических устройств // Журнал «Вестник ИрГТУ», №5. 2011. – С 42–48.

7. Черепанов А.П. Технология прогнозирования ресурса технических устройств на основе ресурсно–прочностных исследований // Журнал «Вестник ИрГТУ», №6. 2011. – С. 16–21.

8. Черепанов А.П., Колмаков В.П. Алгоритмы прогнозирования ресурса технических устройств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 2 (30) 2011. С. 98–104.

9. Черепанов А.П. Прогнозирование ресурса машин на основе данных по их техническому состоянию // Сборка в машиностроении 2012 № 4. С. 6–8.

10. Cherepanov A.P., Poroshin Y.V. Estimating service life of technical devices with due regard for efficiency of their diagnosis // Chemical and Petroleum Engineering. Т. 46. № 1. Volume 46, Numbers 1–2, May 2010, pp. 103–108(6). DOI: 10.1007/s10556-010-9300-2.

11. Cherepanov A.P. Selection of indicators for assessment of overall, computed, and remaining service lives of production equipment // Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 46, Nos. 9–10, 2011, pp. 624–630(7).

Статьи и тезисы докладов в прочих периодических изданиях:

12. Черепанов А.П., Салькова А.Г., Подоплелов Е.В. Остаточный ресурс горизонтальных аппаратов. Методические указания к выполнению курсовых и дипломных работ для специальности 17.05 "Машины и аппараты химических производств". Ангарск, Ангарская государственная техническая академия, 2003. 32 стр.

13. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Компьютерная обработка результатов диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов. Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике. Сборник тезисов 3-ей международной конференции М.:РОНКТД. 2002. 270 с.

14. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Методика расчета эффективности диагностирования сосудов и резервуаров. Прочность и надежность нефтегазового оборудования. М.:ГУП НИКИЭТ. 2001. 42 с. 1 стр.

15. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Влияние дефектов сварного шва на концентрацию напряжений в стенке. Прочность и надежность нефтегазового оборудования. М.:ГУП НИКИЭТ. 2001. 42 с. 1 стр.

16. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Учет дефектов кольцевого сварного шва при оценке остаточного ресурса трубопроводов. Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования в процессе эксплуатации: Тезисы докладов 18 региональной научно-технической конференции в рамках выставки «Приборы и оборудование для неразрушающего контроля и технической диагностики» (16–19 октября, 2001 г.). Иркутск: Издание ОАО ИМВК «Сибэкспоцентр», 2001. 146 с. 2 стр.

17. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Оценка эффективности диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов. Неразрушающий контроль и техническая диагностика оборудования в процессе эксплуатации: Тезисы докладов 18 региональной научно-технической конференции в рамках выставки «Приборы и оборудование для неразрушающего контроля и технической диагностики» (16–19 октября, 2001 г.). Иркутск: Издание ОАО ИМВК «Сибэкспоцентр», 2001. 146 с. 2 стр.

18. Черепанов А.П. Оценка ресурса технических устройств на основе РПИ и технического диагностирования // Тез. докладов на 2-м Ежегодном Международном Восточносибирском нефтесервисном конгрессе, проведенным национальным отраслевым журналом «Нефтегазовая Вертикаль» в г. Красноярске 24–25 сентября 2009 год.

19. Черепанов А.П. Оценка ресурса технических устройств на основе ре-

сурсно–прочностных исследований и технического диагностирования // Научное издание «Разработка, производство и восстановление элементов, машин и аппаратов. Сборник научных трудов» Чита. Читинский государственный университет. 2010. – С. 89–116.

20. Черепанов А.П. Черепанов Е.А. Алгоритм для прогнозирования ресурса технических устройств // Нормативно–техническая база по эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту нефтеперерабатывающего и нефтехимического оборудования. Актуальные вопросы ее применения в современных условиях. Проблемы надежности эксплуатации пластинчатых теплообменников в нефтепереработке: Материалы семинара. – М. ООО «НТЦ при совете главных механиков», 2011–256 с. С 242–246.

21. Черепанов А.П. Концепция методических рекомендаций оценки ресурса технических устройств на основе ресурсно–прочностных исследований // Исследования, проектирование, изготовление, стандартизация и техническая диагностика оборудования, трубопроводов, работающих под давлением/ редкол.: А.М. Кузнецов, Н.А. Махутов и др. – Иркутск: Изд. «ИРКУТ».– 2011. – С. 300–306.

22. Черепанов А.П. Оценка ресурса технических устройств на основе ресурсно–прочностных исследований и технического диагностирования. Кулагинские чтения: XI Международная научно–практическая конференция. Чита: ЗабГУ, 2011.–Ч. 1.– с 53–57.

23. Черепанов А.П. Ресурсно–прочностные исследования и техническая диагностика аппаратов химического производства. Проблемы обеспечения качества производства и услуг: междунар. научно–практ. конф., 8–9 декабря 2011 г. Чита: ЗабГУ, 2011. – с 117–121.

Патенты, интеллектуальные продукты

24. Пат. Рос. Федерации № 2360227, МПК G01N 03/08. Образец для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии // Цвик Л.Б., Черепанов А.П., и др. Заявители: ОАО «ИркутскНИИхиммаш», ГОУ ИрГТУ, ОАО «АНХК». Оpubл.: 27.06.2009, Бюл. № 18.

25. Пат. Рос. Федерации № 2418284, МПК G01N 03/08. Способ испытания пластинчатого образца на усталостную прочность и устройство для его осуществления // Цвик Л.Б., Черепанов А.П. и др. Заявители: ОАО «ИркутскНИИхиммаш», от 30.12.2009.

26. Пат. Рос. Федерации № 2436103, МПК G01N35/00. Способ прогнозирования ресурса объектов повышенной опасности // Черепанов А.П. Заявитель: Черепанов А.П. Оpubл.: 10.12.2011, Бюл. № 34.

27. Пат. Рос. Федерации № 2454648, МПК G01M15/00, G01N3/00. Способ прогнозирования ресурса технических устройств // Черепанов А.П. Заявитель: Черепанов А.П. Оpubл.: 27.06.2012, Бюл. № 18.