

*На правах рукописи*



**Неганов Дмитрий Александрович**

**МЕТОДОЛОГИЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ОБОЛОЧКОВЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ДЛИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

Специальность:

05.02.13 Машины, агрегаты и процессы (нефтегазовая отрасль)

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Уфа 2020

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

**Научный консультант:** доктор технических наук  
**Лисин Юрий Викторович**

**Официальные  
оппоненты:** **Матвиенко Юрий Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБУН «Институт машиноведения им.  
А.А. Благонравова РАН»/ начальник отдела

**Лепихин Анатолий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБНУ «Федеральный исследовательский  
центр информационных и вычислительных  
технологий»/ главный научный сотрудник

**Трифонов Олег Владимирович**  
доктор технических наук, доцент,  
ООО «Газпром ВНИИГАЗ»/ начальник  
лаборатории

**Ведущая организация** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина» (г. Москва).

Защита состоится 12 марта 2021 г. в 10:00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте [http: // www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Латыпов Олег Ренатович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Нефтяной сектор является ведущей отраслью экономики Российской Федерации (РФ), поскольку за счет него генерируется 23 % доходов Федерального бюджета и около 40 % поступлений от экспортной деятельности. В 2020 г. добыча в РФ составит около 10,3 млн. баррелей в сутки. Весной 2022 г., когда ограничения в рамках соглашения ОПЕК+ закончатся, РФ может нарастить добычу до 11,8 млн. баррелей в год. Тогда одним из основных сдерживающих факторов развития отрасли будет являться текущее состояние основных производственных фондов (ОПФ), характеризующихся большой долей износа. В целом, в нефтедобывающей промышленности степень износа ОПФ составляет около 55 %, в трубопроводном транспорте нефти – около 70 %, в нефтепереработке – до 80 %.

В связи с этим возникает необходимость оценки текущего состояния длительно эксплуатируемых ОПФ, к которым относится следующее оборудование: силовые и рабочие машины; сосуды, резервуары; трубопроводы и арматура. Основными элементами, определяющими конструктивную прочность указанного оборудования, являются тонкостенные оболочковые конструкции (ОК) и корпусные конструкции (КК), нагруженные избыточным давлением рабочего тела. К одной из важных составляющих ОПФ нефтяной отрасли относится магистральный транспорт нефти и нефтепродуктов (МТНН). Наибольший размах строительства объектов нефтяной отрасли пришелся на 1970 - 1980 гг. в связи с необходимостью добычи, транспортировки и переработки больших объемов нефти месторождений Западной Сибири. Исследования и разработки в области проектирования, строительства и эксплуатации оборудования, проведенные в то время, позволили сформировать и реализовать общие традиционные нормативные требования к их прочности, основанные на классических расчетных схемах и теориях прочности. Однако, несмотря на накопленный огромный опыт проектирования, создания и функционирования ОПФ нефтяной отрасли и МТНН, пока не удалось избежать отказов и повреждений на всех стадиях жизненного цикла.

Помимо этого, возрастающий износ длительно эксплуатируемых оболочковых и корпусных конструкций, а также постоянное совершенствование средств технического диагностирования приводят к увеличению числа выявляемых технологических и эксплуатационных дефектов, не отраженных в существующих нормативных документах.

Учитывая вышеизложенное, в настоящее время и в перспективе требуется **решение важной народно-хозяйственной** проблемы, заключающейся в формировании научных основ, методов расчетных и экспериментальных обоснований и технологий обеспечения конструктивной прочности длительно эксплуатируемых оболочковых и корпусных конструкций оборудования нефтяной отрасли с учетом ключевых параметров работоспособности – нарастающий износ, деградация конструкционных сталей, возрастание интенсивности изнашивания элементов (развитие дефектности) и достижение не только нормативных, но и новых предельных состояний.

### **Цель и задачи работы**

Цель работы – разработка и развитие методологии поэтапного обоснования конструктивной прочности оболочковых и корпусных конструкций длительно эксплуатируемого оборудования нефтяной отрасли с применением комбинированных основных и поверочных (вероятностных, статистических и детерминированных) методов, позволяющих количественно определять срок безопасной эксплуатации конструкций с учетом их конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, и на этой основе предложить и реализовать новую стратегию технического перевооружения, реконструкции и капитального ремонта (ТПР и КР).

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1 Анализ и систематизация отечественных и зарубежных норм конструктивной прочности оборудования с разделением расчетов на две части – основные и поверочные.

2 Разработка методики основных расчетов и обоснования конструктивной прочности с корректировкой коэффициентов запаса и учетом: напряженных состояний и анизотропии свойств; масштабного фактора; наличия трещиноподобных дефектов.

3 Обоснование перехода от общепринятых детерминированных к новым статистическим и вероятностным расчетам с использованием методов стандартных, унифицированных и специальных испытаний для принятия ситуационных решений в условиях неопределенности.

4 Разработка комплексной системы поэтапного расчетно-экспериментального определения прочности оболочковых и корпусных конструкций оборудования нефтяной отрасли и магистральных трубопроводов.

5 Разработка методологии интеллектуальной и компьютерной поддержки принятия решений по обоснованию технического перевооружения, реконструкции и капитального ремонта оборудования с использованием комплексной информации о его техническом состоянии.

**Предмет исследования** – конструктивная прочность оболочковых и корпусных конструкций в условиях длительной работы оборудования нефтяной отрасли с учетом вариабельности основных конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов.

**Объект исследования** – оболочковые и корпусные конструкции оборудования нефтяной отрасли и магистрального транспорта нефти и нефтепродуктопроводов (трубопроводов, резервуаров, арматуры, агрегатов, технических устройств).

### **Научная новизна**

1 Разработана новая методика оценки работоспособности длительно эксплуатируемого оборудования нефтяной отрасли и МТНН с внедрением интегрированного критерия – вероятности разрушения и дифференцированных, в зависимости от объемов испытаний, коэффициентов запаса прочности, что позволило разработать научную основу в форме расчетных выражений и их параметров для количественного определения конструктивной прочности оболочковых и корпусных конструкций.

2 Существенно усовершенствованы методы детерминированного прочностного расчета оболочковых и корпусных конструкций с введением в расчеты таких факторов, как изменяющееся напряженное состояние; силовые и деформационные характеристики механических свойств; анизотропия свойств сталей; эффект абсолютных размеров; растягивающие остаточные напряжения,

что позволяет дополнительно снижать запасы прочности, по сравнению с нормативным на 10–15 %.

3 Сформулирована и аналитически решена проблема перехода к концепции расчета конструктивной прочности оболочковых и корпусных конструкций по фактическим значениям их базовых характеристик, определенных в рамках созданной и внедренной системы комплексных механических испытаний, с применением вероятностного анализа, состоящего: в получении функций плотности вероятности внешних и внутренних воздействий и соответствующих расчетных эксплуатационных напряжений, расчетных сопротивлений (пределов текучести и прочности), с последующим определением вероятности разрушения в зонах, где эксплуатационные напряжения превышают допускаемые и предельные.

4 Создана и апробирована комбинированная система поэтапного расчетно-экспериментального обоснования прочности длительно эксплуатируемых оболочковых и корпусных конструкций, позволяющая учитывать основные закономерности изменения расчетных параметров, особенность которой состоит в том, что наряду с общепринятыми детерминированными, в случае не обеспечения прочности, используются новые взаимосвязанные вероятностные методы, с учетом статистической информации о возможном состоянии оборудования, условиях его производства, особенностях эксплуатации и технического обслуживания.

### **Теоретическая значимость работы**

Разработана и обоснована комплексная система расчетно-экспериментального определения прочности оболочковых и корпусных конструкций в составе основных производственных фондов нефтяной отрасли и магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов с учетом их декомпозиции по срокам эксплуатации, техническому состоянию и ответственности с комбинацией детерминированных и вероятностных (с использованием расчетной статистической информации о механических свойствах конструкционных сталей и определением запасов прочности), расчетов прочности.

### **Практическая значимость работы**

1 Разработаны и внедрены в АО «Транснефть – Прикамье», АО «Транснефть – Дружба», АО «Транснефть – Сибирь», ООО «Транснефть – Порт Приморск» программные комплексы обоснования конструктивной прочности оболочковых и корпусных конструкций оборудования: информационная система для линейной части магистральных нефтепроводов «Надежность линейной части магистральных трубопроводов»; программный комплекс «Автоматизированное рабочее место оценки технического состояния нефтепроводов) – 2»; база данных механических и химических характеристик сталей «БД МХС». Внедрение комплексов, основу которых составляет методология, разработанная в диссертации, позволило: в течение 5 лет снизить затраты по техническому перевооружению, реконструкции и капитальному ремонту оборудования магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов на 4,2 млрд руб.

2 Разработана и внедрена в практику АО «Выксунский металлургический завод», АО «Ижорский трубный завод», ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» система комплексных механических испытаний труб и оборудования, обеспечивающая стабилизацию качества поставляемой на объекты строительства продукции и повышение надежности и безопасности магистральных трубопроводов.

### **Степень разработанности темы**

На основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения по расчетно-экспериментальному определению прочности оболочковых и корпусных конструкций длительно эксплуатируемого оборудования нефтяной отрасли и магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, имеющая существенное значение для развития страны. Предложена и реализована усовершенствованная стратегия технического перевооружения, реконструкции и капитального ремонта магистрального трубопроводного транспорта жидких углеводородов.

### **Методология и методы исследования**

1 Для получения необходимых исходных расчетных данных проведены лабораторные исследования процессов деформирования и разрушения при стандартных, унифицированных, специальных, стендовых и натурных испытаниях сталей.

2 Для учета разброса базовых расчетных характеристик оболочковых и корпусных конструкций применялись методы статистического и вероятностного анализа расчетных параметров с прямой количественной оценкой эффектов старения и деградации при длительной эксплуатации.

3 Для расчетного обоснования объемов заменяемых компонентов применен всесторонний многофакторный анализ технического состояния оболочковых и корпусных конструкций, представляющий собой комплекс логических процедур и математических расчетов с использованием методов принятия ситуационных решений в условиях неопределенности.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1 Декомпозиция длительно функционирующего оборудования нефтяной отрасли и магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов с дифференциацией оболочковых и корпусных конструкций по расчетным схемам, расчетным случаям, срокам эксплуатации, техническому состоянию и методам обеспечения конструктивной прочности.

2 Двухуровневое теоретико-экспериментальное обоснование конструктивной прочности длительно эксплуатируемого оборудования традиционными основными и новыми поверочными детерминированными методами по номинальным напряжениям и силовым критериям прочности.

3 Статистические и вероятностные закономерности рассеяния расчетных эквивалентных напряжений и расчетных значений механических свойств, вызванных неустойчивостью технологического изготовления, строительства и эксплуатацией оболочковых и корпусных конструкций.

4 Система комплексных механических испытаний, увязанных по стадиям жизненного цикла основных производственных фондов основными и поверочными методами расчетно-экспериментального определения напряженно-деформированных и предельных состояний.

5 Комбинированный расчетно-экспериментальный метод обоснования продления эксплуатации, ремонта и замены с применением разноуровневых многопараметрических подходов, базы знаний и банков данных.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечена: использованием в работе современных методов расчетно-экспериментального определения напряженно-деформированного состояния (НДС), исследованием физико-механических свойств конструкционных сталей (более 20 000 лабораторных и более 1000 стендовых и натурных испытаний); проведением сопоставления результатов вычислительных экспериментов, лабораторных, стендовых и натурных испытаний с результатами технической диагностики в реальной эксплуатации.

Основные положения диссертационной работы докладывались на 15 международных научно-практических конференциях: XI Международной научно-технической конференции «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред» (г. Оренбург, 2015); VII Российской научно-практической конференции «Актуальные вопросы нефтегазового строительства» (г. Москва, 2016); Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А.Х. Мирзаджанзаде (г. Уфа, 2016); XXIII Конференции «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (г. Тольятти, 2016); XXI Всероссийской научной конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 2017); XVI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» (г. Москва, 2017); XII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2018); 13 PIPELINE TECHNOLOGY CONFERENCE (Berlin, 2018); VI Всероссийской конференции «Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем» (г. Красноярск, 2019); XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Уфа, 2019) и др.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертационная работа соответствует паспортам специальностей: 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль)», а именно п. 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»; 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно п. 7. – «Исследования в области ресурса трубопроводных конструкций, в том числе прогнозируемого при проектировании и остаточного при их эксплуатации».

### **Публикации по результатам исследований**

По теме диссертации опубликована 61 работа, 36 статей в журналах, рекомендованных ВАК, 18 статей в журналах, входящих в Scopus и WoS; получено 10 свидетельств о государственной регистрации интеллектуальных прав.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и основных выводов; содержит 420 страниц текста, 40 таблиц, 96 рисунков и библиографический список из 208 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность проблемы, сформулирована цель работы и определены решаемые задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований.

В **первой главе** представлен анализ отечественной и мировой практики обеспечения конструктивной прочности оболочковых и корпусных конструкций оборудования нефтяной отрасли (Рисунок 1).

Определено, что так как расчетные схемы и модели оболочковых и корпусных конструкций являются фактически универсальными моделями обобщенного типа, то представленные в работе методические подходы к расчету прочности имеют единый характер и могут использоваться для расчета оболочковых и корпусных конструкций нефтедобывающей и

нефтеперерабатывающей промышленности.



Рисунок 1 – Структура оборудования нефтяной промышленности

Для сложившейся во второй половине XX века системы отечественного и зарубежного оборудования нефтяной отрасли характерно многоэтапное создание и развитие комплексных подходов: выбора методов расчета, различных схем, эксплуатационных воздействий, анализа напряженно-деформированных и предельных состояний. Расчетные схемы несущих конструкций представляются цилиндрическими, сферическими, эллиптическими, коническими, изогнутыми оболочками, оболочками, нагруженными избыточным давлением.

В общую теорию расчетов прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности оболочковых и корпусных конструкций оборудования нефтяной отрасли существенный вклад внесли отечественные ученые (Н.П. Алешин, И.Р. Байков, К.М. Гумеров, Р.С. Зайнулин, И.Г. Ибрагимов, В.П. Ларионов, Н.П. Лякишев, Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, В.Н. Пермяков, Г.С. Писаренко,

Р.Г. Ризванов, С.А. Тимашев), а также зарубежные специалисты (В. Вейбулл, А. Гриффитс, Д. Ирвин, Л. Коффин, Л. Плювенаж).

Во всех случаях расчета на прочность проектные решения для оболочковых и корпусных конструкций должны были удовлетворять классическим условиям прочности – отсутствие разрушения трубопроводов и корпусов при заданных  $p$ ,  $d$ ,  $\delta$  при достижении опасных напряжений на основе формул теории тонкостенных оболочек

$$\sigma = \frac{pd}{K \cdot \delta} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_{оп}}{n_{\sigma}}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от формы ОК и КК ( $2 \leq K \leq 4$ );  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение;  $\sigma_{оп}$  – опасное напряжение;  $n_{\sigma}$  – запас прочности ( $n_{\sigma} > 1$ ).

Выражение (1) принято в качестве базового в зарубежных основных нормативных проектных расчетах по допускаемым напряжениям  $[\sigma]$ . В качестве опасных  $\sigma_{оп}$  принимаются предел прочности  $\sigma_B$  и запас  $n_B$  или предел текучести  $\sigma_T$  и запас  $n_T$  (при этом  $n_T \leq n_B$ )

$$[\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_T}{n_T}, \frac{\sigma_B}{n_B} \right\}, \quad (2)$$

где  $n_T$  – запас по пределу текучести;  $n_B$  – запас по пределу прочности ( $1 \leq n_T \leq n_B$ ).

В отечественных нормах расчет ведется по предельным состояниям (образование пластических деформаций или разрушений) и предельным сопротивлениям (предел текучести  $\sigma_T$  или прочности  $\sigma_B$ ) с введением дифференцированных коэффициентов надежности и условий работы. Это позволяет увязать результаты расчетов по отечественным и зарубежным нормам расчета через систему коэффициентов

$$\{n_T, n_B\} = \frac{nK_1K_H}{m}, \quad (3)$$

где  $n$ ,  $K_1$ ,  $K_H$  – коэффициенты надежности соответственно по нагрузке,

материалу и назначению ( $1,1 \leq n \leq 1,15$ ;  $1,34 \leq K_1 \leq 1,55$ ;  $1 \leq K_n \leq 1,05$ );  $m$  – коэффициент условий работы.

В зарубежных и отечественных нормах расчета по (1)–(3) величины  $n_\sigma$ ,  $n_T$ ,  $n_B$  и  $n$ ,  $m$ ,  $K_1, K_2$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  приняты детерминированными; при этом проектные расчетные толщины стенок  $\delta$  различаются не более, чем на 8–10 %. Запасы  $n_T$ , варьируются в достаточно широких пределах 1,8–3,2, а  $n_B$  – в пределах 2,4–3,5. Однако, как показывает отечественный и зарубежный опыт, длительная эксплуатация оборудования, спроектированного по (1)–(3), сопровождалась преждевременными повреждениями. Это явилось основным стимулом в разработке новых усовершенствованных методов расчета. В число новых методов в рамках настоящей работы были включены две группы комбинированных методов с учетом всех стадий жизненного цикла (СЖЦ): основные и поверочные расчеты (гл. 1) для всех характерных предельных состояний; детерминированные (гл. 2), статистические (гл. 3), вероятностные (гл. 4) методы для обоснования соответствующих методов (гл. 5) и их реализации при оценках прочности основных категорий оборудования и трубопроводов (гл. 6). В такой комбинированной поэтапной постановке проблемы прочности оборудования и трубопроводов нефтяной отрасли ранее не решались.

Во **второй главе** изложено текущее состояние и перспективы развития **детерминированных нормативных методов** обоснования прочности и надежности оболочковых и корпусных конструкций оборудования нефтяной отрасли с учетом опыта проведения расчетов прочности оборудования атомных и тепловых электростанций. В диссертации предложено в развитие расчетов по (1)–(3) разделить расчеты на две части – основные и поверочные для применения на соответствующих стадиях жизненного цикла (Рисунок 2).

**Основные расчеты** – это традиционные расчеты, которые позволяют на стадиях I, II и III определить базовые параметры оболочковых и корпусных конструкций, производящиеся преимущественно по критериям статической прочности и с рассмотрением упругого поведения материалов.

В работе предлагается на стадиях жизненного цикла IV и V переход от основных к **поверочным расчетам** на различные сочетания предельных

состояний при циклических, длительных, сейсмических и других воздействиях с возможностью образования статического, циклического и коррозионного разрушения.

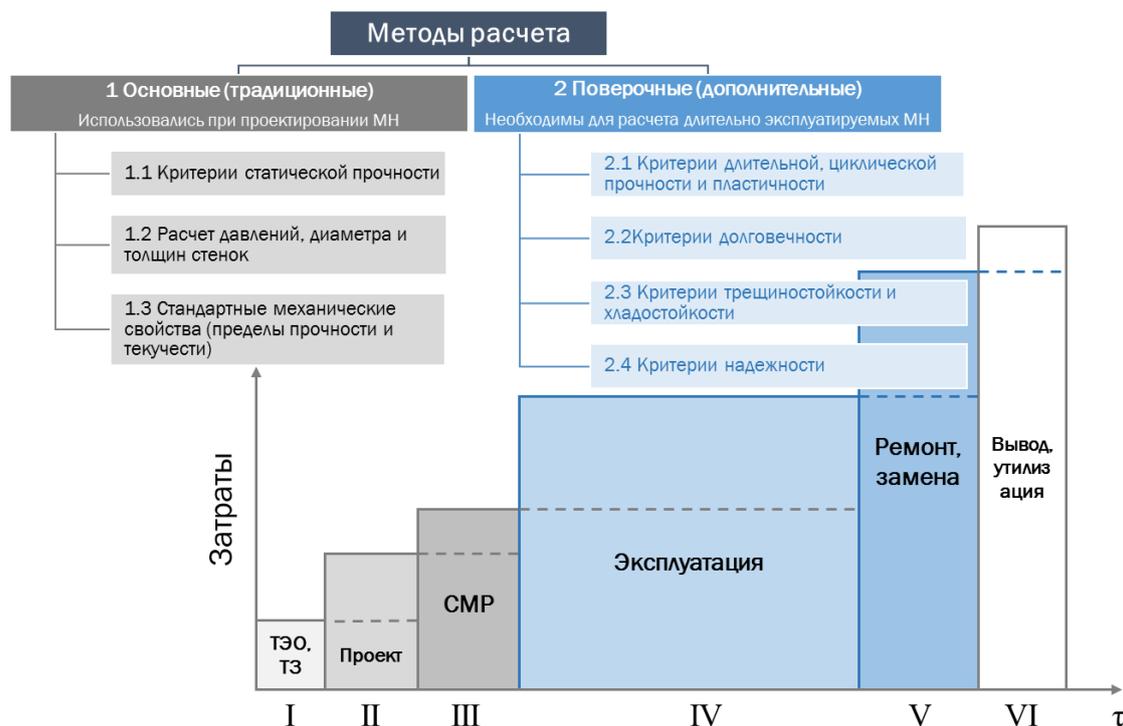


Рисунок 2 – Применение комплексных методов прочностных расчетов на различных стадиях жизненного цикла

Их основной отличительной особенностью является то, что в них учитываются наличие в длительно функционирующих оболочковых и корпусных конструкциях дефектов, а также изменение условий нагружения и механических свойств материалов (прочности и пластичности).

С учетом научных разработок Х.А. Азметова, А.Г. Гумерова, Р.С. Гумерова, О.М. Иванцова, И.Р. Кузеева, Е.М. Морозова, Г.Х. Самигуллина в диссертации представлен новый алгоритм комбинированного применения основных и поверочных детерминированных расчетов на прочность оболочковых и корпусных конструкций для постановки основных задач фундаментальной проблемы прочности, жесткости и устойчивости: анализ внешних эксплуатационных воздействий  $Q^a$  и напряженно-деформированных состояний  $\sigma^a$ ,  $e^a$ ; выбор и обоснование теорий и критериев прочности  $\sigma_k$ , жесткости  $e_k$  и устойчивости  $\sigma_{кр}$ ; назначение и обоснование запаса

прочности  $n_\sigma$  при изменяющихся в процессе эксплуатации расчетных характеристиках в рамках двух ключевых групп задач и расчетных случаев.

**Первая группа задач**, решаемых в диссертации, относится к оценке возможности корректировки системы коэффициентов запаса в выражениях (1)–(3), применяемых для расчета прочности на I–III стадиях жизненного цикла по Рисунку 3, принятой в нашей стране для расчета допустимых рабочих давлений (ДРД) и принципиально не изменявшейся с 1975 года. На основании анализа произошедших за последние 30 лет усовершенствований технологий трубопроводного транспорта, в работе проведены расчеты и обоснован пересмотр нормативных коэффициентов запаса  $n_\sigma$ ,  $n_t$ ,  $n_b$  в сторону их снижения. В соответствии с выполненными расчетами на 90 % трубных секций может быть обеспечено увеличение несущей способности на 1–5 %, на 10 % – снижение в пределах 1–5 %, что повышает безопасность эксплуатации.

Также в работе предлагается пересмотр применяемых *расчетных схем и теорий прочности*. В работе предложен уточненный метод определения компонентов главных эксплуатационных напряжений  $\sigma^3$ :

$$\sigma = \sigma^3 = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\} = F_\sigma\{\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z, \tau_{XZ}\} = F_p\{p, N, M_{KX}, M_{UY}, M_{UZ}\}. \quad (4)$$

Эквивалентные напряжения по классическим теориям прочности равны

$$\begin{aligned} \sigma_I^3 &= \sigma_1; \sigma_{II}^3 = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3); \sigma_{III}^3 = \sigma_1 - \sigma_3; \\ \sigma_{IV}^3 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\mu$  – переменный коэффициент Пуассона ( $0,25 \leq \mu \leq 0,5$ ).

Для тонкостенных цилиндрических и сферических оболочек (при  $\delta/d \leq 0,02$ ) под внутренним давлением  $p$  главные напряжения соответственно равны

$$\sigma_1 = \frac{pd}{2\delta}; \sigma_2 = \frac{pd}{4\delta}; \sigma_3 = -p, \quad \sigma_1 = \sigma_2 = \frac{pd}{4\delta}; \sigma_3 = -p. \quad (6)$$

Так как  $\sigma_3$  существенно меньше  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , то при  $\mu=0,3$

$$\sigma_I^3 = \sigma_1; \sigma_{II}^3 = 0,85 \sigma_1; \sigma_{III}^3 = \sigma_1; \sigma_{IV}^3 = 0,87 \sigma_1. \quad (7)$$

В уточненном расчете, по сравнению с нормативными, на основе выражений (1)–(3) оценка  $\sigma$  проводится для всех сочетаний воздействий в упругой и пластической области с переменным коэффициентом Пуассона  $\mu$ , зависящим от величины упругопластических деформаций.

Традиционно в основных проектных расчетах прочности по (1)–(3) для оболочковых и корпусных конструкций используются I или III теории прочности, и в связи с этим расчеты дают результаты в запас прочности. В работе обоснована возможность применения IV теории прочности.

**Базовые характеристики механических свойств.** В качестве опасного напряжения  $\sigma_{оп}$  в выражениях (1) и (2) в отечественных и зарубежных нормах используются стандартные характеристики механических свойств: предел прочности  $\sigma_b$  для предельного состояния по однократному статическому разрушению; предел текучести  $\sigma_m$  или условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  (при допуске на остаточную пластическую деформацию 0,2 %) для предельного состояния по возникновению и развитию пластических деформаций.

Для основных проектных расчетов  $p$ ,  $d$ ,  $\delta$  участок упругого деформирования характеризуется модулем упругости  $E$  и пределом текучести  $\sigma_T$  или  $\sigma_{0,2}$ , для уточненных поверочных – участок упругопластического деформирования характеризуется показателем упрочнения  $m$

$$E = \frac{\sigma_T}{e_T}; m \cong \frac{d\sigma}{de} \quad (0 \leq m \leq 1). \quad (8)$$

Для используемых в нефтяной отрасли низколегированных углеродистых сталей величина  $m$  находится в пределах 0,05–0,30. Уравнения состояния – кривые деформирования в условных  $(\sigma, e)$  и в истинных напряжениях  $\sigma_{и}$  и деформациях  $e_{и}$  имеют вид

$$\sigma_{и} = \sigma_T \left( \frac{e_{и}}{e_T} \right)^m. \quad (9)$$

При упругих деформациях ( $e \leq e_T$ )  $m = 1$  и  $\sigma = e(\sigma_T/e_T) = e \cdot E$ .

Разрушение определяется параметрами: для диаграммы в условных напряжениях  $\sigma_b$  и  $\sigma_k$  и деформациях  $\delta_b$  и  $\delta_k$ , а для диаграмм в истинных

напряжениях и деформациях соответственно  $S_K$  (сопротивление отрыву) и  $e_K$  (истинная пластичность). При этом

$$e_K = \ln \frac{100}{100 - \psi_K}, m = \frac{\lg\left(\frac{S_K}{\sigma_T}\right)}{\lg(e_K)}. \quad (10)$$

В работе обосновывается необходимость перехода от применения в расчетах прочности только  $\sigma_b$  и  $\sigma_m$  к учету всей диаграммы в условных напряжениях и деформациях и обязательно использовать  $m$  и  $e_K$ .

**Второй группой задач** диссертации стали задачи развития поверочных расчетов прочности для стадий жизненного цикла IV и V по Рисунку 3. В основных детерминированных расчетах по (1)–(3) значения  $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$  берутся нормативными, величины  $p$  и  $d$  – заданными, а величина  $\delta$  рассчитывается. В поверочных расчетах для каждой из категорий напряжений могут быть использованы понижающие (в 1,1–1,5 раза) запасы статической прочности  $n_\sigma$ .

Факторы времени  $\tau$ , цикличности  $N$ , изменяющееся напряженное состояние; силовые и деформационные характеристики механических свойств; анизотропия механических свойств; эффект абсолютных размеров сечений; растягивающие остаточные напряжения, в основных расчетах в явном виде не учитываются и отражаются в косвенной форме коэффициентами выражения (3). В рамках работы предложено в поверочных детерминированных расчетах прочности учитывать данные факторы, что позволит дополнительно снижать запасы прочности по сравнению с нормативными значениями на 10–15 %.

**Влияние напряженного состояния на образование пластических деформаций и предельную прочность и пластичность.** В рамках работы была выполнена проверка обобщенной расчетной и экспериментальной информации по результатам испытаний трубчатых образцов, цилиндрических и сферических оболочек. Показано, что с увеличением относительных компонентов главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  по (4)–(8) предельная пластичность  $e_K$  снижается.

В уточненном поверочном анализе используются относительные компоненты главных напряжений и относительные координаты для диаграмм

упругопластического деформирования. Коэффициент снижения предельной пластичности  $D_e$  для уточненных расчетов определяется по выражению

$$D_e = \frac{e_i^0}{e_i^{\wedge}} = \sigma_i / \sigma_c = \frac{3\sqrt{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_3 - \bar{\sigma}_1)^2}}{\sqrt{2}(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)}, \quad (11)$$

где  $e_i^0, e_i^{\wedge}$  – предельная деформация при объемном и линейном напряженном состоянии;  $\sigma_i$  – интенсивность главных напряжений;  $\sigma_c$  – среднее напряжение.

Для тонкостенных конструкций в условиях плоского напряженного состояния (при  $0 \leq \bar{\sigma}_2 \leq 1$  и  $\bar{\sigma}_3 = 0$ ) коэффициент  $D_e$  монотонно снижается ( $0,5 \leq D_e \leq 1$ ). Выражение (11) указывает на повышение опасности хрупких разрушений конструкций. Эти обстоятельства предложено учитывать при проверочных расчетах прочности по выражениям (4)–(7), когда

$$\sigma_B^0 = \sigma_B D_e^m, e_K^0 = e_K D_e. \quad (12)$$

Выражение (12) необходимо учитывать при оценке долговечности (в напряжениях  $\sigma, \sigma_m, \sigma_g$ ) по силовым и деформационным (в деформациях  $e, e_K$ ) критериям.

**Анализ влияния напряженных состояний на предельные характеристики.** Основные расчетные уравнения (1)–(8) для определения статической прочности по I–IV теориям прочности в явном виде не учитывают совместное влияние напряженных состояний.

При указанном выше изменении  $D_e$  от 1 до 0,5 расчетная пластичность  $\bar{e}_K^0$  будет снижаться до 2 раз, а расчетный предел прочности  $\bar{\sigma}_B^0$  при  $m = 0,1–0,25$  будет находиться в пределах от 1 до 0,84.

Это означает, что запас  $n_\sigma$  в (3) может оказаться недостаточным для обеспечения статической прочности и поэтому в основных и проверочных расчетах по (1) необходимо вводить соответствующие поправки  $\varphi$  к нормативным запасам  $n_\sigma$

$$n_{\sigma o} = n_\sigma \cdot \varphi_o, \quad (13)$$

где  $\varphi_o$  – коэффициент снижения запасов прочности.

При уточненных расчетах прочности оболочковых и корпусных конструкций предложено учесть повышение сопротивления пластическим деформациям при объемном напряженном состоянии

$$(\sigma_{\text{во}}, \sigma_{\text{то}}) = \{\sigma_T, \sigma_B\} I_\sigma, \quad I_\sigma = \frac{\bar{\sigma}_{10}}{\bar{\sigma}_1}, \quad (14)$$

где  $I_\sigma$  – коэффициент повышения первого главного напряжения  $\sigma_1$  при возникновении пластических деформаций или разрушения за счет объемности, зависящий от отношения интенсивностей напряжений при объемном и линейном напряженном состоянии.

По I–IV теориям прочности с учетом (1)–(5) этот коэффициент соответственно равен

$$\begin{aligned} I_\sigma^I &= 1, \quad I_\sigma^{II} = 1/[1 - \mu(\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3)]; \\ I_\sigma^{III} &= 1, \quad I_\sigma^{IV} = \sqrt{2/[(1 - \bar{\sigma}_2)^2 + (\bar{\sigma}_2 - \bar{\sigma}_3)^2 + (\bar{\sigma}_3 - 1)^2]}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для оболочковых и корпусных конструкций только под внутренним давлением величина  $I_\sigma$  по (15) находится в пределах 1,0–1,17, а при  $\sigma_1 = -0,1$  в пределах 1,0–1,3. По (14), (15) в уточненных проверочных расчетах прочности, когда одновременно учитываются снижение запасов прочности и увеличение сопротивления пластическим деформациям, можно ограничиваться только нормативными запасами  $n_\sigma$  в выражениях (1)–(3).

Для изотропного материала конструкций (трубопроводов, резервуаров, корпусов насосов и арматуры) поправки к запасам, определенные по (5) в рамках выполненных в диссертации исследований при возникновении осевых сжимающих напряжений, приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты снижения запасов прочности по I–IV теориям прочности

Теория прочности	I	II	III	IV
$\phi_o$	$\sigma_1/\sigma_I^3$	$\sigma_1/\sigma_{II}^3$	$\sigma_1/\sigma_{III}^3$	$\sigma_1/\sigma_{IV}^3$
$\phi_o$ трубопровод, корпус	1	1,13	0,90	1,09
$\phi_o$ резервуар	1	0,94	0,90	1,00
$\phi_{oa}$ трубопровод, корпус	0,85	1,06	0,89	0,78
$\phi_{oa}$ резервуар	1,0	0,89	0,77	0,80

**Анализ влияния анизотропии.** Если имеет место выраженная анизотропия в направлении толщины (т), поперек проката (п) и вдоль проката (в)

$$\{\sigma_{тт}, \sigma_{вт}\} < \{\sigma_{тп}, \sigma_{вп}\} < \{\sigma_{тв}, \sigma_{вв}\}, \quad (16)$$

то эквивалентные напряжения  $\sigma^э$  по (5) оказываются одновременно зависящими от напряженного состояния и степени анизотропии и снижаются в большей мере, чем повышение главных напряжений за счет  $I_\sigma$  по (14). В этом случае в поверочных расчетах необходимо учитывать снижение запасов прочности  $n_\sigma$  в (1)–(3), особенно при низких уровнях прочности в направлении толщины, когда  $\{\sigma_{тт}, \sigma_{вт}\} \ll \{\sigma_{тв}, \sigma_{вв}\}$  и возможны разрушения расслоением.

В этом случае в компоненты главных напряжений должны вводиться поправочные коэффициенты анизотропии  $K_a\{\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3\} = \{\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_2, \bar{\sigma}_3\} / \{K_{a1}, K_{a2}, K_{a3}\}$  для первого, второго и третьего главного напряжения. По результатам экспериментов величины  $K_a$  равны

$$K_{a1} = \left\{ \frac{\sigma_{тв}}{\sigma_{тв}}, \frac{\sigma_{вп}}{\sigma_{тв}} \right\} = 1,0; \\ K_{a2} = \left\{ \frac{\sigma_{тп}}{\sigma_{тв}}, \frac{\sigma_{вп}}{\sigma_{вв}} \right\} = 1,0 \div 0,90; K_{a3} = \left\{ \frac{\sigma_{тт}}{\sigma_{тв}}, \frac{\sigma_{вт}}{\sigma_{вв}} \right\} = 1,0 \div 0,1. \quad (17)$$

Низкие значения  $K_{a3}$  объясняют разрушения расслоением оболочковых и корпусных конструкций при возникновении растягивающих напряжений  $\sigma_z$  в направлении толщины (в зонах отводов и фланцев). По аналогии с (13) для учета влияния анизотропии запас прочности в поверочных расчетах по (1)–(3) предложено определять как

$$n_{\sigma a} = n_\sigma \cdot \varphi_a, \quad (18)$$

где  $\varphi_a$  – коэффициент снижения запаса прочности, равный  $K_a$  по (17).

**Анализ влияния масштабного фактора на прочность.** Влияние эффекта абсолютных размеров на прочность и долговечность конструкций оборудования имеет статистический и технологический характер. По данным специально выполненных экспериментов (Н.А. Махутов, В.В. Москвичев, В.Н. Пермяков) изменение расчетных механических свойств (физического  $\sigma_T$  или условного  $\sigma_{0,2}$  предела текучести, предела прочности  $\sigma_B$  и пластичности  $\psi_k$ ) при изменении площади поперечного сечения  $F$  (от  $10^0$  до  $3 \cdot 10^5$  мм<sup>2</sup>) описывается по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_T &= (\sigma_T)_0 (F_0/F)^{m_T} = (\sigma_{0,2})_0 f(\sigma_{0,2}), \\ \sigma_B &= (\sigma_B)_0 (F_0/F)^{m_B} = (\sigma_B)_0 f(\sigma_B), \\ \psi_K &= (\psi_K)_0 \left(\frac{F_0}{F}\right)^{m_\psi},\end{aligned}\quad (19)$$

где  $(\sigma_m)_0$ ,  $(\sigma_\epsilon)_0$ ,  $(\psi_K)_0$  – пределы соответственно текучести, прочности и пластичности малого лабораторного образца с площадью поперечного сечения  $F_0$ ;  $m_m$ ,  $m_\epsilon$ ,  $m_\psi$  – характеристики материала с площадью  $F$ .

Показатели степени  $m_m$ ,  $m_\epsilon$  незначительно зависят от марки стали и механических свойств;  $f(\sigma_{0,2})$ ,  $f(\sigma_\epsilon)$  – безразмерные функции, характеризующие зависимость регистрируемых механических свойств от размера поперечного сечения образца. Повышение степени легирования сталей приводит к снижению  $m_\psi$  от 0,04 до 0,024.

Сопоставление в диссертации результатов определения механических характеристик с учетом масштабного фактора ( $F$ ,  $\delta$ ,  $d$ ) по выражению (19) и эксплуатационной повреждаемости трубопроводов различного диаметра  $d$  и толщины  $\delta$  свидетельствует об их корреляции (Рисунок 3).

При увеличении  $d$  трубопроводов от 400 до 1200 мм наблюдался рост повреждений, свидетельствующий о необходимости внедрения дополнительного коэффициента снижения прочности.

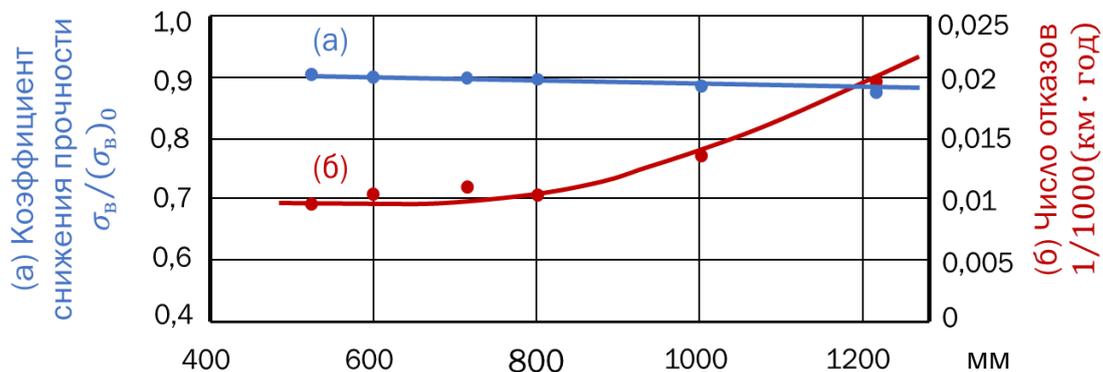


Рисунок 3 – Влияние на коэффициент снижения прочности  $\sigma_B / (\sigma_B)_0$  (а) и число отказов (б) диаметра трубопровода  $d$

**Идентификация корпусных и трубных сталей.** Одной из наиболее сложных актуальных задач обоснования и обеспечения прочности оборудования и трубопроводов, подлежащих решению нормативными поверочными детерминированными методами, стала задача установления типа,

марки и свойств конструкционных сталей, связанная с отсутствием или потерей в процессе длительной эксплуатации проектной документации с полным набором расчетных выражений и расчетных параметров.

В диссертации предлагается использовать решение серии обратных задач на базе основных и поверочных детерминированных расчетов по выражениям (3), (6). По измеренным рабочим давлениям  $p$ , диаметрам  $d$  и толщинам стенки  $\delta$  предложено устанавливать номинальные напряжения, и по результатам прямых или косвенных фактических измерений идентифицировать использованные стали, оценивать их расчетные пределы прочности  $\sigma_g$  и текучести  $\sigma_m$  при выбранных запасах  $n_g$ ,  $n_m$ , чтобы решать проблему возможности дальнейшей эксплуатации оболочковых и корпусных конструкций.

**В третьей главе установлены основные статистические закономерности рассеяния расчетных параметров прочности оболочковых и корпусных конструкций.**

**Статистическая природа расчетных характеристик обусловлена неустойчивостью:** технологических процессов получения сталей; изготовления исходного листового материала; изготовления из листов прокатки; сварки с разбросом диаметров труб и остаточных напряжений; изготовления литьем корпусов насосов, арматуры и т.д.

Указанные факторы обуславливают рассеяние исходных эквивалентных напряжений  $\sigma_c^g$  и расчетных значений указанных механических свойств  $\sigma_{Tc}$ ,  $\sigma_{Bc}$ . Все эти данные в конечном счете сказываются на статистических расчетных величинах запасов прочности  $n_{\sigma c}$  и допускаемых напряжений  $[\sigma]_c$  в сравнении с детерминированными данными  $n_\sigma$  по выражениям (1)–(3).

В качестве примера на Рисунке 4 представлена диаграмма рассеяния фактических значений механических характеристик основного металла труб марки 17Г1С при однофакторной дисперсии с использованием методов обработки больших объемов неструктурированных накопленных данных, используемых в науке о данных.

Характерны такие разбросы и для агрегатов, причем в рамках одного образца оборудования. Например, разброс предела текучести стали 34ХН3М из

которой изготавливаются корпуса плунжерных насосов, определенный в рамках работы, достигает 20 % (756,7–949,3 МПа). В работе обоснована необходимость перехода от исследования марок стали при основных расчетах к исследованию технических условий (ТУ) производства оболочковых и корпусных конструкций при поверочных расчетах.

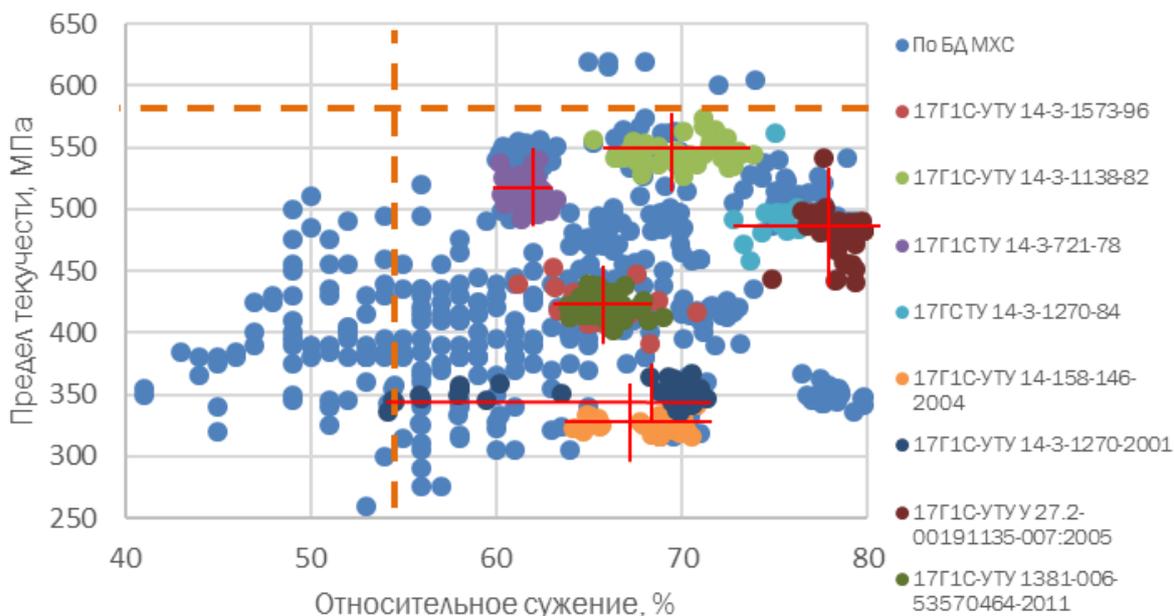


Рисунок 4 – Диаграмма рассеяния значений для трубной марки стали 17Г1С

На Рисунке 5 представлена диаграмма рассеяния результатов механических испытаний металла труб с учетом только марки стали и с учетом марки стали и технических условий производства труб.

Статистический анализ расчетных параметров для основных поверочных расчетов прочности имеет своей целью установление: минимальных (*min*), средних (*m*) и максимальных (*max*) значений расчетных параметров; их сопоставимости со значениями, принятыми в проектной документации; отклонений расчетных параметров в опасную и безопасную сторону.

На этой базе предлагается принимать два решения о возможности или невозможности дальнейшей эксплуатации оболочковых и корпусных конструкций. В первом случае должно выполняться основное требование к прочности оболочковых и корпусных конструкций по выражениям (1)–(3).

Во втором случае, когда не выполняется основное требование, прочность считается не обеспеченной, если измеренные максимальные эксплуатационные

напряжения превосходят допускаемые или измеренные давления  $p_c$  превосходят расчетные  $p$

$$\sigma_{\max c}^{\exists} \geq [\sigma]; p_c^{\exists} \geq p. \quad (20)$$

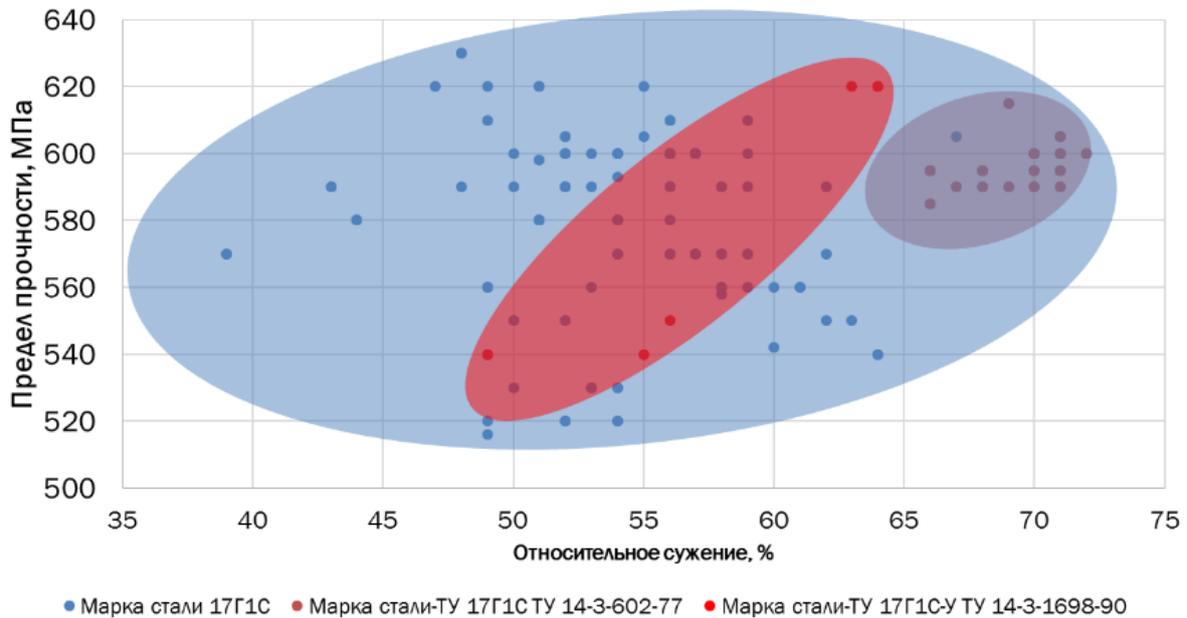


Рисунок 5 – Диаграмма рассеяния значений предела прочности в зависимости от относительного сужения для марки стали 17Г1С

В расчет конструкций должны входить статистически обоснованные: максимальные значения эксплуатационного давления  $p_{\max}^{\exists}$ ; максимальные значения диаметра  $d_{\max}$ ; минимальные значения толщины стенки  $\delta_{\min}$ ; минимальные значения характеристик механических свойств  $\sigma_{T\min}$ ,  $\sigma_{B\min}$ .

В этом случае рекомендовано использовать проверочные расчеты в форме (3), принятой в детерминированных расчетах

$$\sigma_c^{\exists} = F_{\sigma} \{p_{\max}^{\exists}, d_{\max}, \delta_{\min}\} \leq [\sigma] = \min \left\{ \frac{\sigma_{B\min}}{n_B}, \frac{\sigma_{T\min}}{n_T} \right\}, \quad (21)$$

где  $n_B$ ,  $n_T$  – нормативные запасы прочности.

Условие прочности по выражению (21) целесообразно проверять по данным статистического анализа и при выполнении условий (20).

При этом как для условия (20), так и для условий (21) целесообразно дать оценку прочности по (2) или (3):

- при средних значениях всех параметров  $p_m^{\exists}$ ,  $d_m$ ,  $\delta_m$ ,  $\sigma_{Tm}$ ,  $\sigma_{Bm}$ ;

$$\sigma_c^3 = F_\sigma\{p_m^3, d_m, \delta_m\} \leq [\sigma] = \min\left\{\frac{\sigma_B m}{n_B}, \frac{\sigma_T m}{n_T}\right\}; \quad (22)$$

- при экстремальных (крайних) значениях: максимальных  $p_{min}^3, \delta_{max}, d_{min}, \sigma_{T max}, \sigma_{B max}$  и минимальных  $p_{max}^3, \delta_{min}, d_{max}, \sigma_{T min}, \sigma_{B min}$ .

$$\begin{aligned} \sigma_{min}^3 &= F_\sigma\{p_{max}^3, d_{min}, \delta_{max}\} \leq [\sigma] = \min\left\{\frac{\sigma_{B max}}{n_B}, \frac{\sigma_{T max}}{n_T}\right\}; \\ \sigma_{max}^3 &= F_\sigma\{p_{min}^3, d_{max}, \delta_{min}\} \leq [\sigma] = \min\left\{\frac{\sigma_{B min}}{n_B}, \frac{\sigma_{T min}}{n_T}\right\}. \end{aligned} \quad (23)$$

Таким образом, детерминированный анализ прочности оболочковых и корпусных конструкций по выражениям (3)–(17) дополняется статистическим по выражениям (20)–(23) с учетом расчетных (средних, минимальных, максимальных) значений  $p, d, \delta, \sigma_T, \sigma_B$ .

В четвертой главе установлено, что **вероятностные методы оценки прочности** оборудования нефтяной отрасли для особых расчетных случаев, критически важных объектов и участков трубопроводов, создающих высокие техногенные риски, при необеспечении прочности детерминированным и статистическим методами приобретают приоритетное значение.

Разработки в области вероятностных методов расчета сложных объектов и трубопроводных систем выполнялись В.В. Болотиным, С.Л. Голофастом, О.М Иванцовым, И.Р. Кузеевым, С.А. Тимашевым, В.В. Харионовским и др.

Накопление статистической информации (гл. 3) в виде гистограмм об основных расчетных параметрах прочности дало возможность в диссертации переходить к наиболее полному и сложному вероятностному анализу.

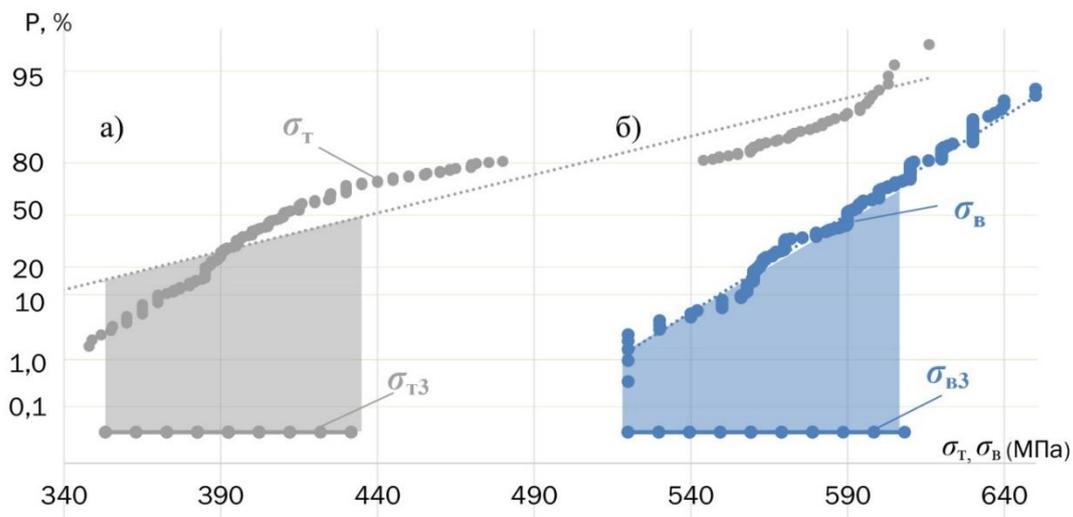
В диссертации обоснован и принят метод построения функций вероятностей разрушения  $P_p$  для расчетных характеристик с использованием коэффициентов вариации для оценки запасов прочности, в котором для построения функций плотности вероятности  $p(\tau)$  требуется представительная исходная информация о функциях  $p(\sigma_{nmax}^3)$  и  $p\{\sigma_T, \sigma_B\}$ . Для оболочковых и корпусных конструкций предлагается расчетом оценивать запасы  $n_\sigma$  для заданного квантиля  $\alpha$  или вероятности распределения  $P$

$$(n_\sigma)_p = \frac{\{\sigma_T, \sigma_B\}_\alpha}{(\sigma_{max}^3)_\alpha} = \frac{\{\sigma_T, \sigma_B\}_p}{(\sigma_{max}^3)_p}. \quad (24)$$

Квантили  $\alpha$  устанавливаются по экспериментальным данным для функций  $p(\tau)$  и  $P(\tau)$ . Эти функции, в свою очередь, имеют статистическую основу, что и делает величину  $(n_\sigma)_p$  со своими параметрами статистического разброса и вероятностей.

При принятых в нормах запасах  $n_\sigma\{n_T, n_B\}$  в выражениях (2), (3) большом объеме исходной статистической информации для большого числа функций распределения  $P$  вероятности разрушения  $P_p$  получаются ниже, чем  $10^{-8}$ – $10^{-9}$ . Вероятностные расчеты в этой области  $P_p$  имеют существенные неопределенности. В связи с этим в работе предлагается проводить построение функций вероятности разрушения  $P_p$  по расчетным зависимостям (1) для  $P\{\sigma_{n\max}^3(\tau)\}$  и  $P\{\sigma_T, \sigma_B\}$ .

На Рисунке 6 показаны функции распределения  $P$  для характеристик прочности  $\{\sigma_T, \sigma_B\}$ . Он построен по данным заводских испытаний и испытаний после длительной (до 40–50 лет) эксплуатации труб из стали 17Г1С в вероятностных ординатах  $P$  и линейных абсциссах  $\sigma_T, \sigma_B$  для выборки  $n = 173$ .



а) для исходного состояния –  $\sigma_{T3}, \sigma_{B3}$ ; б) после длительной эксплуатации –  $\sigma_T, \sigma_B$   
Рисунок 6 – Функции распределения  $P$  прочности стали 17Г1С

В результате проведения базовой статистической обработки данных, полученных при испытаниях на растяжение образцов металла, определено, что большинство результатов испытаний подчиняются: для основного металла – логистическому распределению (Таблица 2); для околошовной зоны – нормальному закону распределения (Таблица 3).

Таблица 2 – Вид функции распределения характеристик основного металла

Марка стали	Функция распределения для характеристик свойств			
	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
1	2	3	4	5
13Г1С-У	Logistic	Logistic	Logistic	Logistic
14ГН	Logistic	Logistic	Logistic	Logistic
16Г2-У	Poisson	Logistic	Normal	Logistic
17Г1С	Logistic	Logistic	Logistic	Logistic
17Г1С-У	Logistic	Logistic	Logistic	Logistic
17Г2СФ	Logistic	Logistic	Logistic	Logistic
X67	Poisson	Logistic	Logistic	Normal
K52	Logistic	Logistic	Logistic	Normal

Таблица 3 – Вид функции распределения характеристик околошовной зоны

Марка стали	Функция распределения для характеристик свойств			
	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
1	2	3	4	5
13Г1С-У	Normal	Log Normal	Normal	Normal
14ГН	Normal	Normal	Normal	Normal
16Г2-У	Normal	Log Normal	Normal	Normal
17Г1С	Normal	Log Normal	Normal	Normal
17Г1С-У	Normal	Gamma	Normal	Logistic
17Г2СФ	Normal	Log Normal	Log Normal	Normal
X67	Normal	Normal	Normal	Log Normal
K52	Normal	Log Normal	Log Normal	Normal

Построенные функции распределения основных механических свойств по фактическим данным при длительной эксплуатации  $P\{\sigma_\tau, \sigma_B\}$  и  $P\{\sigma_{n\max}^3(\tau)\}$  являются основой для построения функций вероятности разрушения  $P_r$ . Она, в свою очередь, является базовым показателем для определения объектов, требующих компенсирующих воздействий для обеспечения безопасной эксплуатации, если величина  $P_r$  оказывается больше допускаемой.

В пятой главе предложена и обоснована новая комплексная система расчетно-экспериментального определения прочности (Рисунок 7).

**Основной детерминированный расчет.** Выражения (1)–(3) являются исходными и основными при общепринятых нормативных оценках прочности оболочковых и корпусных конструкций на первых стадиях жизненного цикла – формирование технико-экономического обоснования (ТЭО) и технического задания (ТЗ) (I) и проектирования (II).



Рисунок 7 – Комплексная система расчетно-экспериментального обоснования прочности ОК

**Поверочные детерминированные расчеты** в диссертации для стадий жизненного цикла эксплуатации (IV), ремонта (V) и вывода из эксплуатации (VI) с использованием (1)–(3) предложено проводить со следующими целями: проверка допустимого эксплуатационного давления  $[p]$  при заданных  $d$ ,  $\delta$ ,  $\sigma_{оп}$ ,  $n_{\sigma}$ ; проверка правильности выбранных и назначенных характеристик механических свойств  $\sigma_{оп}$  ( $\sigma_{Т}$ ,  $\sigma_{В}$ ); проверка допустимой толщины стенки  $[\delta]$  при известных  $p$ ,  $d$ ,  $n_{\sigma}$ ,  $\sigma_{оп}$ ; проверка допустимого запаса прочности  $[n_{\sigma}]$  при известных  $\sigma_{оп}$ ,  $\delta$ ,  $p$ ,  $d$ .

В детерминированных расчетах по (2), (3) проводится систематический анализ факторов неопределенности, которые ранее не учитывались, влияющих на величины  $n_{\sigma}$ ,  $n$ ,  $m$ ,  $K_I$ ,  $K_n$ . К ним были отнесены такие факторы влияния, не учитываемые в основных нормативных расчетах, как: эффект абсолютных размеров сечений ( $d$ ,  $\delta$ ); вид напряженно-деформированного состояния (компоненты главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) по выражениям (11)–(13); анизотропия механических свойств по выражениям (16),

(17); температурно-временное изменение механических свойств  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ , определяющее процессы старения и деградации в процессе эксплуатации.

**Циклическая долговечность.** Для нормативной оценки долговечности  $N$  по силовым критериям в работе используется классическое уравнение кривых циклической прочности по Веллеру в форме выражения

$$\sigma_a^3 \cdot N^{m_N} = C_\sigma, \quad (25)$$

где  $\sigma_a^3$  – амплитуда номинальных эксплуатационных напряжений;  $C_\sigma$ ,  $m_N$  – характеристики циклической прочности ( $0,08 \leq m_N \leq 0,15$ ). Величина  $C_\sigma$  зависит от прочности стали ( $\sigma_T, \sigma_B$ ). Параметры выражения (25) принимаются постоянными.

При возникновении упругопластических деформаций в зонах сварных швов, концентрации напряжений и дефектов циклическая долговечность  $N$  определяется переменной амплитудой  $e_a^3$  локальных деформаций по степенному выражению Коффина – Лангера, аналогичному (25)

$$e_a^3 N^{m_e} = C_e, \quad (26)$$

где  $m_e$ ,  $C_e$  – характеристики материала, устанавливаемые по эксперименту ( $0,3 \leq m_e \leq 0,6$ ).

При  $N \leq 10^5$  показатель  $m_e$  для конструкционных сталей увеличивается по мере роста предела текучести  $\sigma_T$ . Характеристика  $C_e$  зависит от предельной пластичности  $e_k$ , определяемой по выражению (9). Для длительно эксплуатируемых конструкций в общем случае с увеличением времени  $\tau$  параметр  $m_e$  повышается, а  $C_e$  – снижается, что ведет к снижению долговечности  $N$ .

В работе приведены экспериментальные и расчетные данные для параметров выражений (25) и (26). Обосновано, что параметры выражения (25) не являются постоянными и необходим сбор и обобщение данных для различных марок сталей.

**Трещиностойкость.** В детерминированной постановке живучесть оболочковых и корпусных конструкций при циклическом нагружении

определяется скоростью роста трещины  $dl/dN$ , которая с позиции линейной механики разрушения связывается с размахом коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$  степенным выражением Пэриса – Эрдогана

$$dl/dN = C_{K\sigma}(\Delta K)^{m_k}, \quad (27)$$

где  $\Delta K$  – размах коэффициента интенсивности напряжений;  $C_{K\sigma}, m_{K\sigma}$  – экспериментальные характеристики материала ( $2 \leq m_K \leq 4$ );  $N$  – число циклов.

Параметр  $m_k$  увеличивается при увеличении предела текучести  $\sigma_T$  стали. Величина  $C_K$  в общем случае зависит от  $\sigma_0$  и  $\psi_K$ . В расчетах живучести по (27)

$$\Delta K = \Delta\sigma_n \cdot \sqrt{\pi l} \cdot f_k, \quad (28)$$

где  $\Delta\sigma_n$  – размах номинальных напряжений;  $l$  – размер трещины;  $f_k$  – безразмерная функция от размеров трещины и нагружаемого элемента.

При возникновении упругопластических деформаций для  $dl/dN$  по аналогии с (26) в качестве основного параметра включается размах локальной пластической деформации  $\Delta e_{\max}$

$$dl/dN = C_{Ke}(\Delta e_{\max k})^{m_{ke}},$$

где  $C_{Ke}, m_{ke}$  – характеристики материала, определенные экспериментально ( $m_{ke} \approx 2$ ).

Параметр  $C_{Ke}$  зависит от пластичности стали  $\psi_K$  (уравнение 26)

$$e_{\max k} = \Delta e_n \cdot K_e, \quad (30)$$

где  $\Delta e_n$  – размах номинальной деформации, связанный на основе (9) с размахом номинальных напряжений выражением

$$\Delta\sigma_n = \sigma_T(\Delta e/e_T)^m. \quad (31)$$

В работе приведены экспериментальные и расчетные данные для определения параметров выражений (27)–(31).

**Статистические расчеты прочности.** Если на основании проведения расчетов по базовым детерминированным выражениям на стадиях жизненного

цикла IV–VI прочность оболочковых и корпусных конструкций не обеспечивается, то необходимо учитывать характеристики разбросов расчетных параметров. По полученной статистической информации строятся соответствующие гистограммы (Рисунок 8).

Разработанные гистограммы являются основой для построения функций распределения расчетных параметров прочности и дают возможность переходить к вероятностному расчету прочности с оценкой возможности использования нормального закона распределения (при симметричной форме гистограммы).

На базе статистических измерений и оценок всех указанных расчетных параметров давлений  $p$ , механических свойств  $\sigma_T, \sigma_B$ , геометрических размеров  $\delta$  и  $d$  с разбросами в пределах  $\{\min, \max\}$  в первую очередь важным становится определение их средних (медианных) значений расчетных сопротивлений.

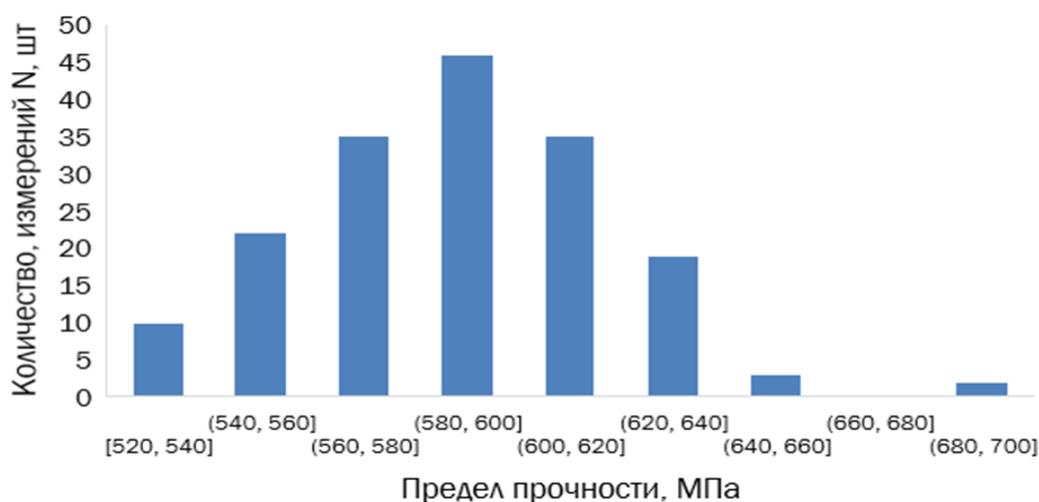


Рисунок 8 – Гистограмма пределов прочности трубной стали 17Г1С

Для стадии проектирования новых объектов статистический анализ расчетных параметров предлагается делать с использованием данных заводских испытаний листовых заготовок для труб ( $\delta$ ), для оболочковых конструкций ( $\delta, d$ ) и лабораторных образцов на статическое растяжение ( $\sigma_T, \sigma_e$ ).

Выражение (3) в виде средних значений  $R_{pm}$  используется для нормативного назначения расчетных параметров  $R_p$ .

$$Rm_{p_{maxmin}} \{ \sigma_T, \sigma_e \}_{min} \leq \{ \sigma_T, \sigma_B \}_p \leq \{ \sigma_T, \sigma_e \}_m \leq \{ \sigma_T, \sigma_e \}; \quad (32)$$

$$Dm_{p_{max_{min}}} ; \delta p_{m_{max_{min}}}.$$

**Статистическая информация** по параметрам выражений (32) (эксплуатационных давлений, геометрических размеров трубы и механических свойств конструкционных сталей) дает возможность решать прямые и обратные задачи на базе основных и поверочных расчетов для оболочковых и корпусных конструкций с использованием (2) и (3). В развитие (1) формула (2) с расчетными статистическими параметрами будет иметь вид

$$\sigma_{max}^{\text{э}} = \frac{p_c d_c}{k \delta_c} \leq \min \left\{ \frac{\sigma_T}{n_T}, \frac{\sigma_B}{n_B} \right\}_c \quad (33)$$

При этом связь между  $\sigma_T, \sigma_B$  должна отвечать неравенству  $\{n_{TC}, n_{BC}\} \leq \{n_T, n_B\}$ . Выражение (33) становится основным при решении вопросов о дальнейшей эксплуатации функционирующих оболочковых и корпусных конструкций на стадиях жизненного цикла IV–VI с учетом данных ВТД и внутри- и внешнекорпусной диагностики.

**Вероятностные расчеты прочности.** Накопление статистической информации в виде функций распределения расчетных параметров прочности (Рисунок 9) дает возможность переходить к вероятностному расчету прочности по зависимости (24).

Разработанные функции распределения в логарифмическом виде, пример которой представлен на Рисунке 9 (б), позволяют реализовать подход, получивший свое отражение в нормативных расчетах по предельным состояниям через коэффициенты надежности  $K_1$  и  $n$  в выражении (3). При построении функций вероятностей  $P(\sigma^{\text{э}})$  и  $P\{\sigma_T, \sigma_B\}$  с определением связи между запасами прочности  $(n_{\sigma})_p, \{n_T, n_B\}_p$  и заданными вероятностями  $P(\sigma^{\text{э}})$ ,  $P\{\sigma_T, \sigma_B\}$  предлагается располагать необходимым объемом исходной статистической информации, зависящим от заданной вероятности  $P$ .

Для решения общепринятых вероятностных задач прочности по параметру вероятности разрушения  $P_p < 10^{-2}$  при нормативных запасах прочности  $n_{\sigma}$  необходим большой объем статистической информации с выборками  $n > 50$ . При меньших  $P_p$  (до  $10^{-3}$ ) нужны сотни измерений ( $n > 500$ ), что во многих реальных случаях затруднено или невозможно. В традиционных

статистических и вероятностных исследованиях механических свойств конструкционных сталей объем выборок  $n$  находился в пределах 20–200.

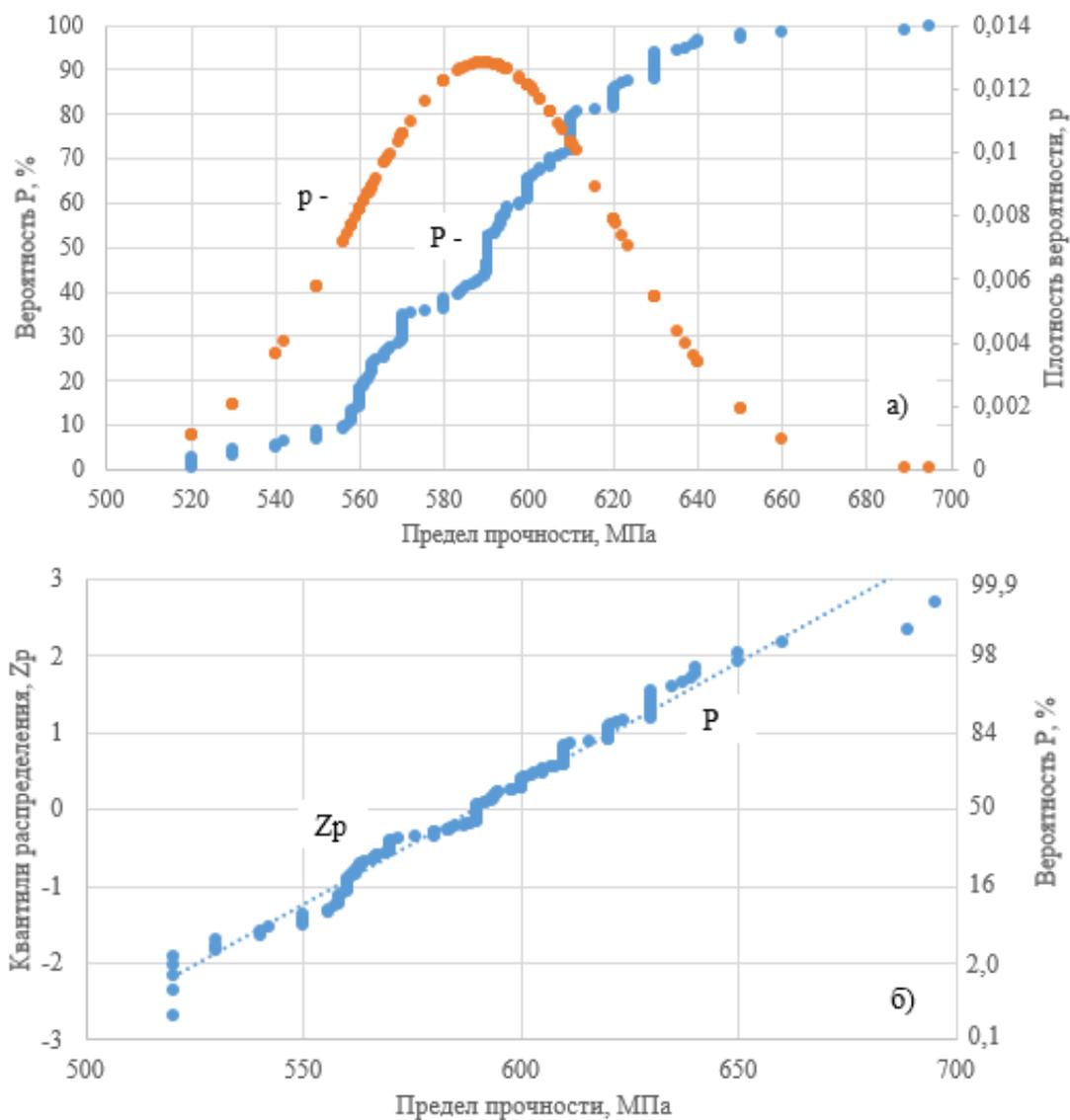


Рисунок 9 - Функции: а) - вероятности распределения  $P$  (в нормальных координатах), плотности вероятности  $p$  для предела прочности стали; б) – квантилей  $Z_p$  и вероятности распределения  $P$  (логарифмическая шкала) для предела прочности стали

В рамках работы определены зависимости величины коэффициента вариации от числа испытанных образцов  $n$  металла труб. Пример зависимости для сталей 17ГС (и ее аналогов) представлен на Рисунке 10.

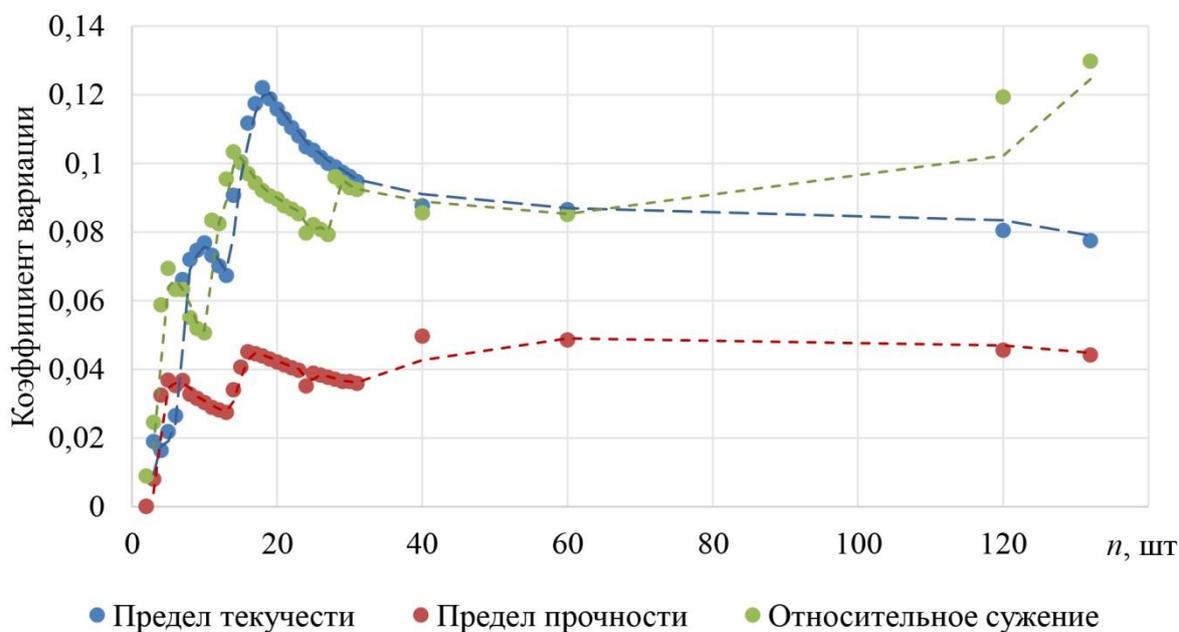


Рисунок 10 – Изменение коэффициента вариации в зависимости от числа испытанных образцов для марки 17Г1С-У

Для серийных труб ( $n > 50$ ) следует использовать осредненные значения коэффициентов вариации, а для конкретно испытанных труб ( $n < 20$ ) – фактические.

На представленной зависимости ярко выражены максимумы по каждой характеристике в области, соответствующей 20 образцам. В диссертации число измерений характеристик механических свойств одной марки стали составило  $n = 160$ , чему соответствует  $P = 0,31 \cdot 10^{-2}$ , для одного технического условия на производство труб  $n = 20$  с  $P = 2,5 \cdot 10^{-2}$ .

В связи с этим более перспективным с практической точки зрения в диссертации обосновывается и предлагается использовать выражение (24) в форме

$$\{n_T, n_\sigma\} = F\{P(\sigma^\sigma), P(\sigma_T, \sigma_\sigma)\}. \quad (34)$$

На Рисунке 11 показана предложенная в диссертации схема реализации вероятностного анализа запасов: по оси абсцисс отложены напряжения  $\sigma_T, \sigma_\sigma, \sigma^\sigma$ , а по оси ординат – вероятности  $P(\sigma^\sigma), P(\sigma_T)$  и  $P(\sigma_\sigma)$  по шкале, соответствующей нормальному закону распределения.

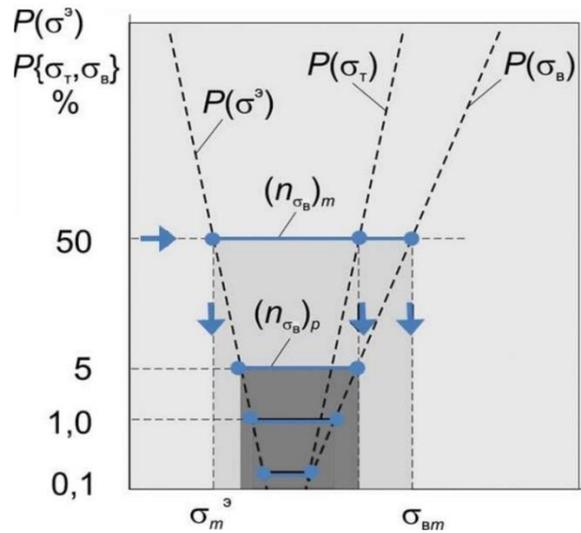


Рисунок 11 – Схема оценки влияния вероятности  $P$  на запасы прочности

Тогда на основе (32) по медианным значениям  $\sigma_m^3$  и  $\sigma_{vm}$  для вероятности  $P = 50\%$  определяется среднее значение запаса  $(n_{\sigma v})_m$ , а для других величин  $P (P < 50\%)$  запасы будут свои меньшие по величине запасы

$$(n_{\sigma v})_m = \frac{(\sigma_v)_m}{(\sigma^3)_m}; (n_{\sigma v})_p = \frac{(\sigma_v)_p}{(\sigma^3)_p}. \quad (35)$$

Если по результатам статистической обработки величин  $\sigma^3$  и  $\sigma_v$  получены параметры их вероятностных распределений – коэффициенты вариации  $v_{\sigma^3}$  и  $v_{\sigma v}$  и их средние значения  $(\sigma_m^3)_m$  и  $(\sigma_v)_m$ , то расчетные значения  $(\sigma_v)_p$  и  $(\sigma^3)_p$  для данной вероятности  $P$  получаются из выражений

$$\{(\sigma^3)_p, (\sigma_v)_p\} = \{(\sigma^3)_m, (\sigma_v)_m\} (1 - Z_p \{v_{\sigma^3}, v_{\sigma v}\}), \quad (36)$$

где  $Z_p$  – квантиль распределения, зависящий от  $P$ .

Для коэффициентов вариации  $v_{\sigma^3}$  и  $v_{\sigma v}$  в пределах 0,03–0,1 расчетные вероятности разрушения  $P_p$  при коэффициентах запаса  $n_{\sigma v} > 1,8$  получаются в пределах на  $10^{-15}$ – $10^{-5}$ . При существующих в настоящее время банках данных об эксплуатационной нагруженности  $\sigma^3$  и механических свойствах сталей  $(\sigma_v, \sigma_T)$  более обоснованным в диссертации предлагается считать определение не величин  $P_p$  в области их низких значений, а определение запасов прочности  $(n_{\sigma})_p$  по заданным параметрам вероятности  $P$  в интервале  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  и выше.

На основе (3), (35), (36) на стадиях жизненного цикла IV–VI можно проанализировать изменения нормативного запаса прочности  $n_e$  при учете вероятностных характеристик нагруженности  $\sigma^3$  и пределов прочности  $\sigma_e$

$$n_p = n_b \frac{1 - Z_p \cdot v_{\sigma_b}}{1 + Z_p \cdot v_{\sigma^3}} = n_b \cdot \bar{n}_p, \quad (37)$$

где  $n_p$  – запас прочности при заданной вероятности  $P$ ;  $n_b$  – запас по средним значениям;  $\bar{n}_p$  – коэффициент снижения запаса  $n_e$  при уменьшении  $P$ ;  $Z_p$  – квантиль распределения;  $v_{\sigma_b}$ ,  $v_{\sigma^3}$  – коэффициенты вариации.

В работе предложено построить поэтапную общую структуру расчетных выборок:  $n = 10^0$  – магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов;  $n = 10^1 - 10^2$  – ответственные высокорисковые трубопроводы;  $n = 10^3 - 10^4$  – участки трубопроводов с повышенными эксплуатационными повреждениями за пределами проектных решений;  $n \leq 10^5$  – длительно эксплуатируемые основные производственные фонды, прошедшие контроль диагностической аппаратурой;  $n \leq 10^6$  – общее число труб в системе МТНН.

Для всех  $n$  ( $10^0 - 10^6$ ) используются детерминированные основные и поверочные расчеты, для  $n = 10^3 - 10^6$  – дополнительные статистические поверочные расчеты, для  $n = 10^0 - 10^2$  – дополнительные вероятностные поверочные расчеты. Расчеты проводятся последовательно, на первом этапе – детерминированные, в случае если по ним расчет прочности не обеспечивается – статистические и вероятностные. Такая последовательность становится необходимой для тех случаев, когда назначенные сроки службы и расчетные долговечности выработаны, а диагностика оболочковых и корпусных конструкций показывает повышенную дефектность.

**В шестой главе** представлены результаты **реализации научных исследований и практических разработок** диссертации (гл. 2–5).

Конечная цель системы комплексных расчетно-экспериментальных исследований – решение проблемы научного обоснования и совершенствования методов оценки прочности и долговечности на стадиях жизненного цикла IV–VI длительно работающих оболочковых и корпусных конструкций.

**Создание системы комплексных механических испытаний.** Расчетные методы оценки прочности оболочковых конструкций предусматривают использование в качестве исходных данных фактические основные механические свойства материалов. В настоящее время основой проведения расчетов являются стандартные механические испытания образцов сталей. В рамках диссертации на основе рассмотрения существующего состояния и перспектив развития предложена система испытаний, представленная на Рисунке 12.

Эти испытания увязаны по стадиям жизненного цикла оборудования. Закономерности упругопластического деформирования и разрушения при различных видах нагружения исследовались в рамках работы на лабораторных образцах, изготовленных из сталей: трубных (17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У, 10Г2ФБЮ, 14ХГС, 13Г1С-У); резервуаров (09Г2С); корпусов оборудования и агрегатов (25Л, 30ХЛ и 20ХМЛ, 12Г2Б, 10ГНМЛ, 20ГЛ, 20ГНМЮЛ).

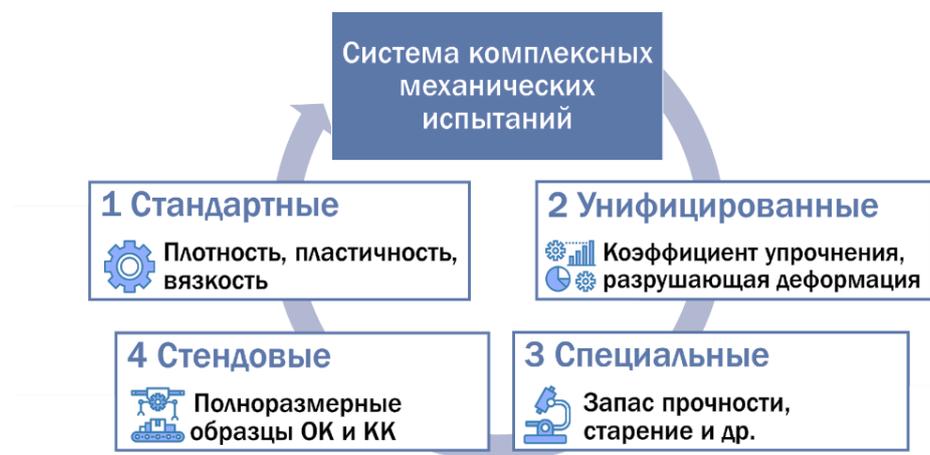


Рисунок 12 – Система комплексных механических испытаний

При **стандартных испытаниях** на статическое растяжение экспериментально получаемые базовые механические характеристики (пределы прочности  $\sigma_v$  и текучести  $\sigma_T$ , модули упругости  $E$ , относительное сужение  $\psi$ ) входят в основные и поверочные расчеты.

Разбросы показателей основных механических свойств испытанных сталей, полученных при однократном статическом растяжении, приведены в Таблице 4.

Таблица 4 – Механические свойства сталей

Марка стали	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\Psi$ , %
1	2	3	4
Трубные стали			
17ГС	362–407	569–592	55–59
17Г1С	345–389	590–598	52–69
17Г1С-У	293–403	530–619	55–64
10Г2ФБЮ	413–594	533–656	70–79
14ХГС	300–405	537–546	49–50
13Г1С-У	481–500	620–633	56–73
Стали резервуаров			
09Г2С	440–450	490–580	19–70
Стали корпусов агрегатов и устройств			
20Л	290–310	510–560	23–50
25Л	265–351	460–552	10–54
30ХЛ	360–400	500–650	40–42
20ХМЛ	300–380	500–580	33–74
12Г2Б	290–430	500–560	54–64
10ГНМЛ	370–390	530–550	66–71
20ГЛ	340–370	530–540	51–71
20ГНМЮЛ	300–320	510–520	54–60

Для поверочных оценок статической прочности выполняют дополнительную расчетную информацию по оценкам рассеяния параметров прочности, пластичности и степени упрочнения сталей.

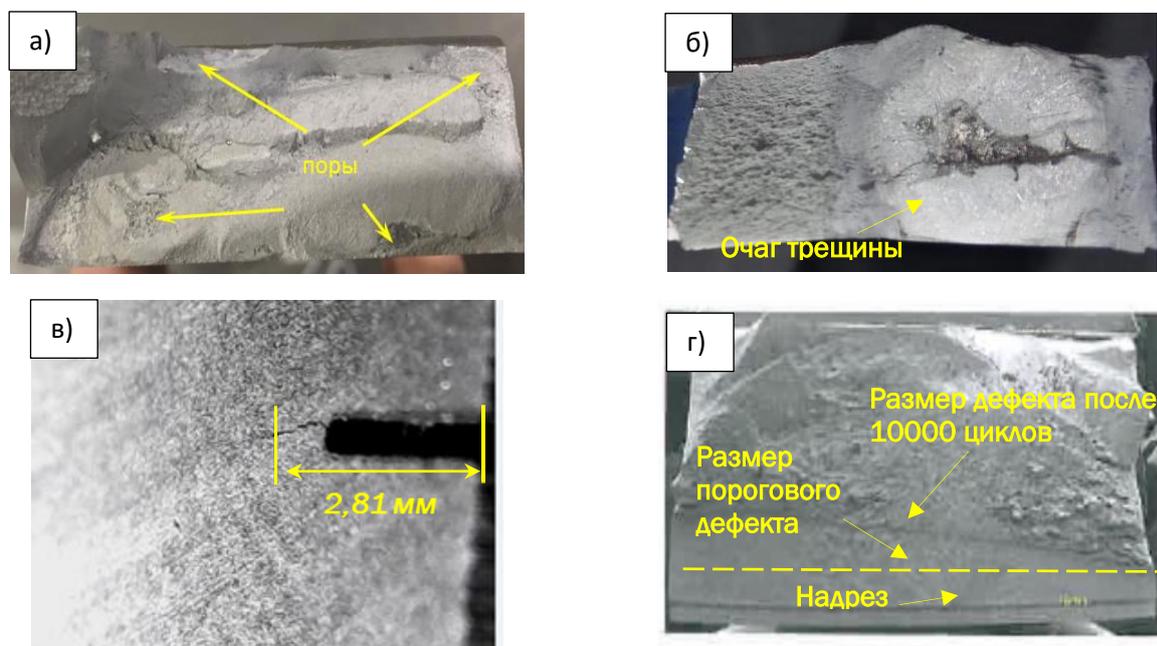
*Унифицированные лабораторные испытания* предназначены для уточненного определения прочности образцов с учетом эффектов объемности напряженного состояния, абсолютных размеров сечений трубопроводов, скорости деформирования, анизотропии и т.д.

Особое место в лабораторных испытаниях занимают *специальные испытания* по оценке малоциклового усталости и трещиностойкости и долговечности сталей по критериям линейной и нелинейной механики деформирования и разрушения (Рисунок 13).

Результаты испытаний образцов являются исходными данными для сформированной в рамках работы методики расчета пороговых размеров дефектов плоскостного типа в сварных швах резервуаров.

В основу методики на основе трудов Е.М. Морозова, Г. Плювенажа положены современные силовые и деформационные критерии разрушения теории магистральных трещин способных распространяться в твердых деформируемых телах. В методике остаточный ресурс сварного шва

оценивается стадией докритического роста усталостной трещины под действием циклически изменяющихся нагрузок и определяется количеством циклов нагружения, за которые размеры трещины достигнут критических значений. Фрагмент результатов расчетов пороговых размеров дефектов приведен в Таблице 5.



а, б) реальные дефекты; в) выращенная трещина;  
г) излом образца с искусственной трещиной

Рисунок 13 – Результаты испытаний образцов

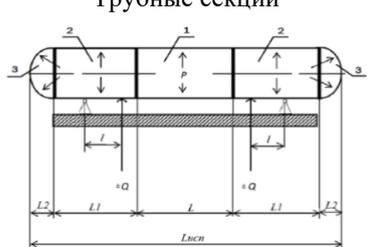
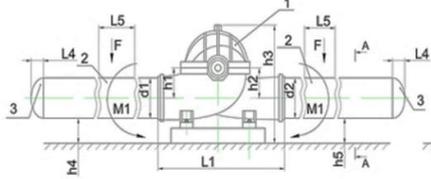
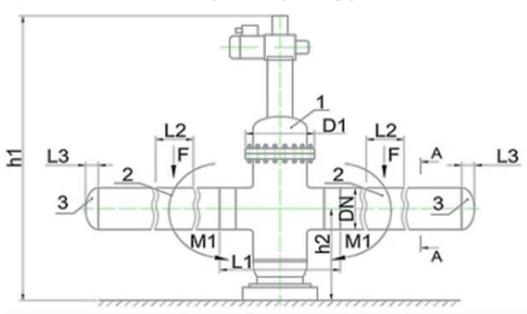
Установленные показатели дефектов позволяют по результатам проведения технического диагностирования обеспечить безопасную эксплуатацию резервуаров, избегая перебраковки дефектов.

Таблица 5 – Результаты расчетов пороговых размеров дефектов сварных швов резервуаров

№ п/п	Высота дефекта, мм	Пороговая длина дефекта (мм) при толщине стенки (мм) и цикличности 350 циклов в год					
		Дефект поперек шва ( $\sigma_{max} = 350$ МПа)			Дефект вдоль шва ( $\sigma_{max} = 190$ МПа)		
		16	20	24	16	20	24
1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	35,6	41,0	46,0	324	473	490
2	4	34,3	36,9	39,5	116	207	443

Для подтверждения адекватности разработанных моделей прочности и долговечности в диссертации используются **стендовые испытания** оборудования с имитацией механических, коррозионных циклических и статических воздействий. С учетом анализа зарубежного и отечественного опыта, в работе сформированы требования для новых стендов для испытаний на конструктивную прочность и ресурсную надежность оборудования (Таблица 6).

Таблица 6 – Характеристики испытательных стендов

Объекты испытаний	Параметры испытаний	Значения
<p>Трубные секции</p>  <p>1 – трубная секция, 2 – проставок, 3 – днище, L<sub>исп</sub> (макс.) ~ 21 м</p>	<b>Величина внутреннего давления, МПа:</b>	
	- при циклическом нагружении	20
	<b>Величина изгибающего момента, МН·м:</b>	
	- при циклическом нагружении	10,2
	- при статическом нагружении (до потери устойчивости)	12,7
	<b>Максимальная длина трубы, L, мм</b>	12 000
<b>Максимальная длина проставка, L1, мм</b>	4000	
<b>Максимальная высота днища, L2, мм</b>	400	
<p>Насосы</p>  <p>1 – насос, 2 – адаптер, 3 – днище</p>	<b>Величина внутреннего давления, МПа:</b>	
	- при циклическом нагружении	12,75
	- при статическом нагружении	18,75
	<b>Величина изгибающего момента, МН·м:</b>	
	- при циклическом нагружении	8,0
	- при статическом нагружении	5,0
<b>Величина крутящего момента, МН·м:</b>		
- при статическом нагружении	6,0	
<p>Запорная арматура</p>  <p>1 – задвижка, 2 – адаптер, 3 – днище</p>	<b>Массогабаритные характеристики испытываемых насосов</b>	
	<b>Мин. размер/Макс. размер, мм:</b>	
	L1	1400/2800
	L2	1700/2500
	L3	800/1400
	h1	300/600
	h2	300/600
	h3	1500/2350
	h4	400/500
	h5	100/200
	d1	300/800
	d2	300/800
	<b>Минимальная масса, т</b>	3
	<b>Максимальная масса, т</b>	10,3
	<b>Массогабаритные характеристики испытываемых задвижек</b>	
	<b>Мин. размер/Макс. размер, мм:</b>	
	DN	400/1200
	L1	1700/3200
	D1	900/2200
	h1	2900/7400
h2	900/3400	
<b>Минимальная масса, т</b>	3	
<b>Максимальная масса, т</b>	40	

**Испытательная жидкость** – водомасляная эмульсия. **Частота циклов изменения** (перемещения гидроцилиндров), Гц – 0,04.

В международной практике (США, Япония, Норвегия, Германия) стендовые испытания натуральных образцов оборудования используются как обязательный элемент системы подтверждения соответствия качества труб, задвижек, насосов.

### Методология реализации комплексных методов обоснования прочности длительно эксплуатируемых оболочковых и корпусных конструкций.

В основе разработанной в диссертации методологии лежит всесторонний (многофакторный) поэтапный анализ технического состояния длительно эксплуатируемых конструкций, представляющий собой комплекс логических процедур традиционных и новых методов расчета определяющих параметров прочности, базирующихся на сборе, анализе и обобщении исходных проектных данных и результатов обследований (Рисунок 14).

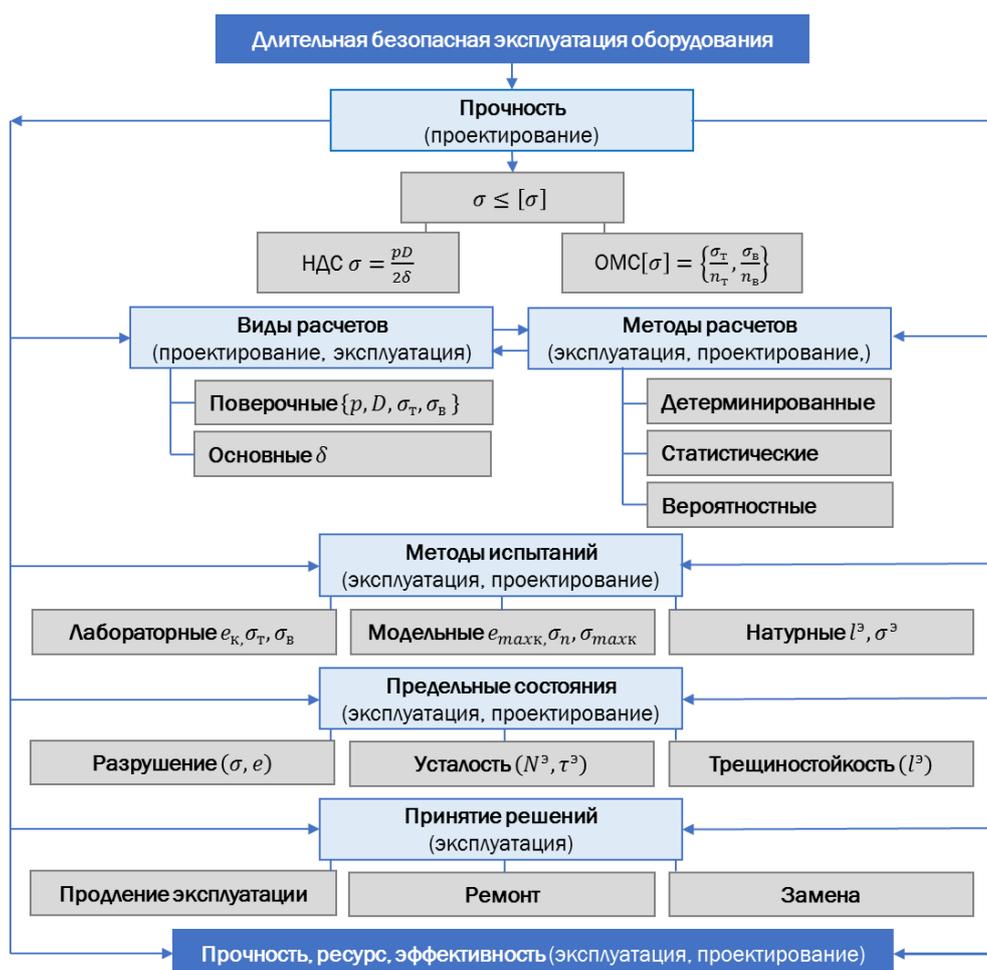


Рисунок 14 – Расчетно-экспериментальное обоснование длительной эксплуатации оборудования

В рамках работы выполнен расчет общей протяженности и очередности замены участков линейной части магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов, осуществляющийся с применением методов исследования операций, применяемых для нахождения оптимальных решений в условиях неопределенности на основе математического моделирования.

С учетом стадий жизненного цикла, основных и поверочных расчетов реализация алгоритма по Рисунку 14 состояла в решении следующих задач:

- проведение лабораторных исследований механических свойств сталей ( $\sigma_T, \sigma_B, S_k, \psi_k$ ) в исходном состоянии ( $\tau = \tau_0$ ) и после длительной эксплуатации для определения статической прочности по системе выражений (1)–(24);

- проведение лабораторных исследований при циклическом нагружении с заданными амплитудами напряжений  $\sigma_a$  и деформаций  $e_a$  вне зон концентрации и в зонах концентрации  $e_{maxa}$  по выражениям (25), (26);

- проведение лабораторных испытаний образцов с острыми надрезами типа трещин для оценки циклической трещиностойкости по скоростям роста трещин  $dl/dN$  по выражениям (27)–(31);

- расчет и испытания всего спектра основного оборудования с целью определения фактических значений прочности и ресурса и обеспечить существенный экономический эффект. Для всего комплекса задач, представленных на Рисунке 14, в рамках работы реализована компьютерная поддержка принятия решений по обоснованию технического перевооружения и реконструкции оборудования с использованием комплексной информации об их техническом состоянии с применением технологии распределенных реестров и баз знаний.

Результаты автоматизированных расчетов представлены на рисунке 15. До внедрения разработанного в диссертации комплексного подхода весь участок магистрального нефтепровода, представленный на Рисунке 15, подлежал замене в 2020 году.

На основании разработанных методов была определена оптимальная стратегия технического перевооружения и реконструкции участка, включающая в свой состав комбинацию компенсирующих мероприятий (замену трубопроводов; ремонт дефектов трубы и АКП; установка

дополнительных средств электрохимической защиты), разнесенных по времени реализации, на основании анализа вероятности разрушения. Это позволило без снижения показателей надежности обеспечить значительную экономию финансирования.

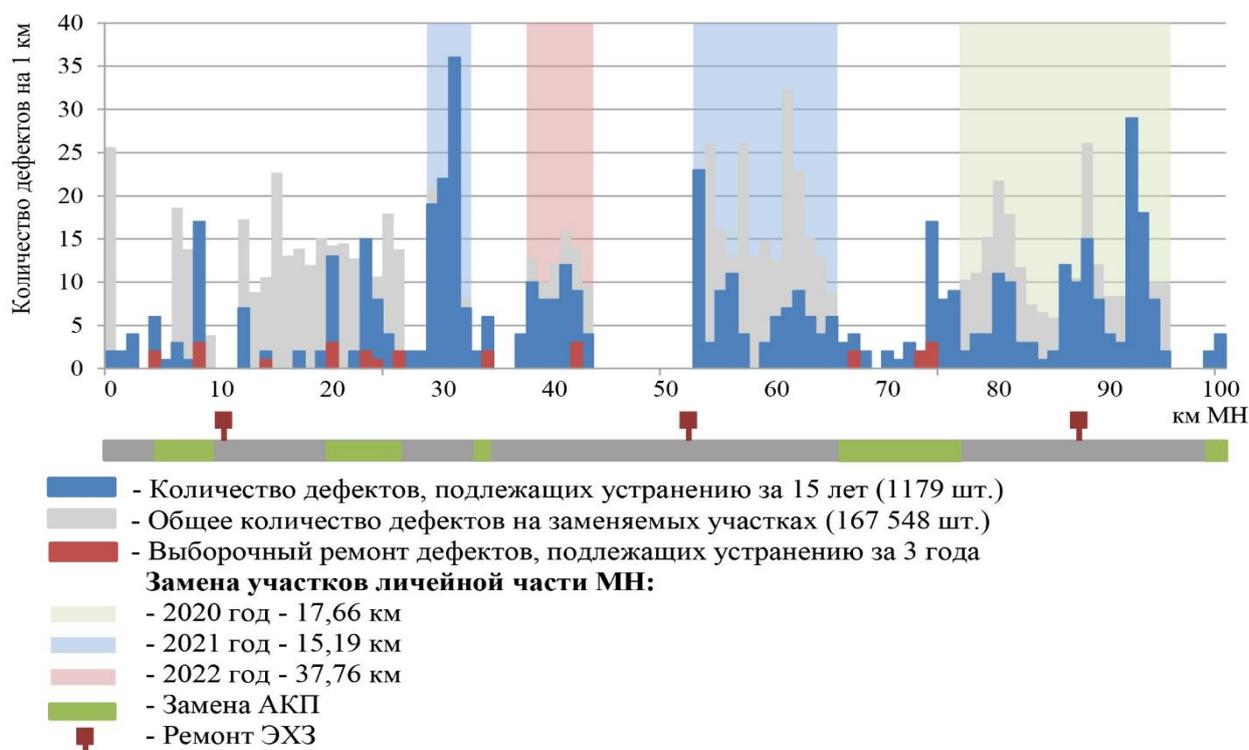


Рисунок 15 – Результаты расчетов протяженности замены трубы и методов ремонта на участке магистрального нефтепровода

Помимо основной задачи, решенной в диссертации, переход на расчет прочности по фактическим базовым свойствам оборудования позволил разработать ряд методик обоснования прочности длительно эксплуатируемых конструкций, представленных в работе, к ним относятся:

- анализ перепадов давления для определения приведенной цикличности нагружения магистральных нефтепроводов с целью моделирования фактической цикличности на основании данных СДКУ;

- выбор основных размеров, конструктивных форм, материалов с учетом технологии изготовления трубной продукции; формирование требований к закупаемой продукции;

- совершенствование методов ремонтных работ с учетом анализа напряженно-деформированных состояний высоконагруженных элементов трубопроводного транспорта при сложных системах нагружения.

**Экономическая эффективность разработок.** Основными практически важными и экономически эффективными применениями комплексного подхода, разработанного в рамках настоящего исследования, являются: планирование и выполнение ремонтно-восстановительных работ на резервуарах, арматуре; расчетное обоснование замены поврежденных оболочковых и корпусных конструкций с использованием комплексных данных об их техническом состоянии; расчетное обоснование протяженности заменяемых оборудования и участков линейной части и распределения очередности их замены. Расчетный ежегодный экономический эффект за счет обоснования, обеспечения и повышения несущей способности оборудования и магистральных нефтепроводов ПАО «Транснефть» оценивается в 1450 млн руб.; при этом за счет обоснования допустимой дефектности трубопроводов – 570 млн руб., продления сроков эксплуатации оборудования – 540 млн руб., сокращения объема ремонтных работ – 340 млн руб. По данным актов внедрения полученных результатов научных и прикладных диссертационных разработок общий экономический эффект за пятилетний период составил 4200 млн. руб.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В рамках выполненных научных исследований и прикладных разработок:

1 Сформированы, усовершенствованы и научно обоснованы комплексные методы поэтапного расчета прочности несущих оболочковых и корпусных конструкций оборудования нефтяной отрасли. Это требует постановки и решения принципиально новой проблемы поэтапного комплексного анализа прочности, долговечности на всех стадиях жизненного цикла с применением наряду с широко используемыми основными дополнительными поверочных расчетов для длительно эксплуатируемых оболочковых и корпусных конструкций, учитывающих наличие дефектов, изменение условий нагружения и механических свойств материалов.

2 Установлено, что в рамках детерминированных расчетов прочности подлежат уточненному количественному учету такие факторы, как: широко изменяющееся напряженное состояние от внутреннего давления, осевых сил, изгибающих и крутящих моментов; анизотропия механических свойств трубных сталей; эффект абсолютных размеров сечений в технологии изготовления и строительства. Данные факторы приводят к дополнительному снижению прочности оболочковых и корпусных конструкций на 10–15 %.

3 На основе экспериментальных и расчетных данных установлено и использованы основные статистические закономерности изменения расчетных параметров, обуславливающих рассеяние рабочих давлений, толщин стенок, диаметров, эквивалентных напряжений и расчетных значений расчетных механических свойств (пределов прочности и текучести), а также запасов прочности и допускаемых напряжений.

Показана необходимость построения функций плотности вероятности и функции распределения для всех основных расчетных вероятностных параметров (рабочие давления, пределы прочности и текучести, толщины стенок и т.д.) в целях определения расчетной вероятности разрушения  $P_p$  объекта и обоснованного понижения запасов  $n_\sigma$  в 1,1–1,2 раза. В этом случае требуемую расчетную вероятность разрушения  $P_p$  предлагается использовать как интегральный показатель надежности объекта для формирования очередности компенсирующих мероприятий в рамках программы ТПР и КР.

4 Предложена и обоснована новая комплексная система поэтапного расчетно-экспериментального определения прочности оболочковых и корпусных конструкций длительно эксплуатируемого оборудования нефтяной отрасли, включающая: основные детерминированные расчеты прочности для всех систем и их компонентов на всех стадиях жизненного цикла; поверочные статистические расчеты прочности при установленных отклонениях от проектных решений; поверочные вероятностные расчеты прочности для ограниченного числа наиболее ответственных оболочковых и корпусных конструкций и формирования интегрального показателя надежности объекта. В рамках реализации системы разработана унифицированная система лабораторных испытаний, стендовых и натурных испытаний, контроля и

диагностики состояния сталеб, корпусных и оболочечных конструкций оборудования и трубопроводов.

5 Реализация научных исследований и практических разработок диссертации на основании определения расчетной вероятности разрушения  $P_p$  позволила классифицировать оболочковые и корпусные конструкции нефтяной отрасли по их техническому состоянию, рассчитывать и назначать технологии обеспечения надежной эксплуатации в работе реализована усовершенствованная стратегия технического перевооружения и реконструкции с введением в анализ производственной и экономической эффективности и использованием комплексных данных о техническом состоянии оболочковых и корпусных конструкций с применением распределенных баз знаний.

В результате внедрения результатов исследования была снижена аварийность магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов не менее чем на 15 % и достигнут суммарный экономический эффект от внедрения указанных комплексных научных исследований и практических разработок в размере 4200 млн руб. без снижения показателей надежности.

**Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:**

***Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК России***

1 Неганов Д.А. Основы детерминированных нормативных методов обоснования прочности трубопроводов / Д.А. Неганов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – № 6(8). – С. 608–617.

2 Лисин Ю.В. Комплексный анализ запасов прочности трубопроводов и базовых механических свойств трубных сталеб / Ю.В. Лисин, [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 1(7). – С. 30–38.

3 Неганов Д.А. Исследование конструкций гидравлических стендов для испытаний трубной продукции / Д.А. Неганов, [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 2(7). – С. 31–41.

4 Неганов Д.А. Оценка технического состояния резервуаров на основе новых подходов к определению сроков их безопасной эксплуатации / Д.А. Неганов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 2. – С. 13–19.

5 Лисин Ю.В. Определение допустимых рабочих давлений для длительно эксплуатируемых магистральных трубопроводов по результатам внутритрубной диагностики / Ю.В. Лисин, Д.А. Неганов, А.А. Сергаев // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 6. – С. 30–37.

6 Неганов Д.А. Разработка расчетных схем подземных трубопроводов с ненормативной кривизной оси с учетом данных внутритрубной диагностики / Д.А. Неганов, [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 6(7). – С. 16–27.

7 Неганов Д.А. Анализ несущей способности трубопровода при действии эксплуатационных нагрузок / Д.А. Неганов, В.М. Варшицкий, О.А. Козырев // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 95–98.

8 Неганов Д.А. Особенности учета перепадов давления для определения цикличности нагружения магистральных трубопроводов / Д.А. Неганов, С.Н. Масликов, М.Г. Ромашин // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 1. – С. 83–87.

9 Неганов Д.А. Статистические факторы прочности нефтепроводов / Д.А. Неганов // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 131–134.

10 Лисин Ю.В. Идентификация трубных сталей отечественного и зарубежного производства / Ю.В. Лисин, [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 90–95.

11 Неганов Д.А. Применение данных внутритрубной диагностики для расчета несущей способности трубопроводов с использованием уточненного коэффициента надежности / Д.А. Неганов, [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 8. – С. 130–133.

12 Лисин Ю.В. Учет масштабного эффекта при обосновании прочности магистральных трубопроводов / Ю.В. Лисин, [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 6. – С. 112–116.

13 Махутов Н.А. Риски и безопасность энергетического оборудования / Н.А. Махутов, М.М. Гаденин, Неганов Д.А. // Электрические станции. – 2017. – № 2. – С. 2–9.

14 Махутов Н.А. Анализ напряженно-деформированных и предельных состояний в экстремально нагруженных зонах машин и конструкций / Н.А. Махутов, [и др.] // Чебышевский сборник. – 2017. – № 3(18). – С. 394–416.

15 Лисин Ю.В. Комплексные механические испытания для расчетов прочности магистрального трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов / Ю.В. Лисин, [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – № 4(84). – С. 47–59.

16 Неганов Д.А. Исследование дефектов литых корпусных деталей насосов и разработка технологии их ремонта / Д.А. Неганов, Н.Г. Гончаров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2016. – № 5. – С. 84–89.

17 Неганов Д.А. Основные и поверочные методы обоснования прочности магистральных нефтепроводов с учетом стадий их жизненного цикла / Д.А. Неганов // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 5. – С. 100 – 103.

18 Неганов, Д.А. Формирование требований к надежности и безопасности эксплуатируемых участков линейной части магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов / Д.А. Неганов, Н.А. Махутов, Н.Е. Зорин // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 6. – С. 106–112.

19 Неганов Д.А. Комплексный анализ прочности магистральных нефтепроводов / Д.А. Неганов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 2(9). – С. 128–136.

20 Неганов, Д.А. Анализ повреждаемости и прочности длительно функционирующего нефтегазохимического оборудования / Д.А. Неганов // Нефтегазовое дело. – 2020. – № 2(18). – С. 105–111.

### **Патенты**

1 Пат. 2672242 Российская Федерация, МПК F17D 1/00. Способ определения протяженности и очередности замены участков линейной части магистральных трубопроводов / П.А. Ревель-Муроз, А.А. Захаров, Д.А. Неганов, [и др.]; заявители и патентообладатели ПАО «Транснефть», ООО «НИИ Транснефть». – № 2018115946; заявл. 27.04.2018, опубл. 12.11.2018, Бюл. № 32. – 18 с.

2 Пат. 2685458 Российская Федерация, МПК G01N 3/42. Способ определения прочностных свойств низкоуглеродистых сталей / П.И. Шотер, А.Н. Воронцов, Ю.В. Лисин, Д.А. Неганов, [и др.]; заявители и патентообладатели ПАО «Транснефть», АО «Транснефть – Диаскан», ООО «НИИ Транснефть». – № 2018105370; заявл. 13.02.2018, опубл. 18.04.2019, Бюл. № 11. – 8 с.

3 База данных 2018620898 Российская Федерация. Магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы. Техническое состояние и надежность объектов линейной части / П.А. Ревель-Муроз, С.Н. Чужинов, Д.А. Неганов, [и др.]; заявители и правообладатели ПАО «Транснефть», АО «Транснефть – Диаскан», ООО «НИИ Транснефть». – № 2018620109; заявл. 23.01.2018, опубл. 22.06.2018, Бюл. № 7.

### **Публикации в других изданиях**

1 Lisin Y.V. Probabilistic Analysis of Transportation System for Oil and Natural Gas / Y.V. Lisin, [et al.] // Probabilistic Modeling in System Engineering Edited by Andrey Kostogryzov. – 2018. – Vol. 4. – P. 81–103.

2 Neganov D.A. Structural analysis of vertical storage tanks using new approaches to determine their safe operational life / D.A. Neganov // Pipeline Science and Technology. – 2017. – Vol. 1. № 1. – P. 49–56.

3 Lisin Y.V. A comprehensive analysis of pipeline safety factors and of the basic mechanical properties of pipe steels / Y.V. Lisin, [et al.]// Pipeline Science and Technology. – 2017. – Vol. 1. № 1. – P. 5–16.

4 Neganov D.A. Statistical analysis of mechanical test results for samples of pipes from trunk oil pipelines after long-term operation / D.A. Neganov, S.V. Skorodumov, N.Yu. Nikitin // Pipeline Science and Technology. – 2018. – Vol. 2. № 2. – P. 107–122.

5 Lisin Y.V. A comprehensive study of steel properties in trunk oil and petroleum product pipelines with various service lives / Y.V. Lisin, [et al.]// Pipeline Science and Technology. – 2017. – Vol. 1. № 3. – P. 195–208.

6 Neganov D.A. Combined calculated, experimental and determined and probable justifications for strength of trunk crude oil pipelines / D.A. Neganov, N.A. Makhutov // Probability, combinatorics and control Edited by Andrey Kostogryzov. – 2020. – P. 81–103.