

На правах рукописи



АБДРАХМАНОВА КАРИНА НАИЛЕВНА

**МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОЛОЧКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПОСРЕДСТВОМ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ**

Специальность 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность
(нефтегазовая отрасль)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа – 2022

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Тляшева Резеда Рафисовна

Официальные оппоненты: Самигуллин Гафур Халафович
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет
ГПС МЧС России / кафедра пожарной
безопасности технологических процессов и
производств, профессор

Сущев Сергей Петрович
доктор технических наук, профессор
ООО «Центр исследований экстремальных
ситуаций», генеральный директор

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Российский государственный
университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени
И.М. Губкина» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «10» июня 2022 года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450064, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте www.rusoil.net.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Латыпов Олег Ренатович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Обеспечение безопасности производства, решение задач, связанных с предупреждением возможных аварийных ситуаций, минимизация рисков, продление ресурса безопасной эксплуатации оборудования являются первостепенными задачами для специалистов в области промышленной безопасности. Изучением данной темы занимались Н.А. Махутов, А.А. Александров, И.Р. Кузеев, В.В. Москвичев, В.Н. Пермяков, С.П. Суцев, В.И. Ларионов, Г.Х. Самигуллин, М.В. Лисанов, А.М. Козлитин и другие.

Современная стратегия развития промышленной безопасности основана на принципе прогнозирования и предупреждения техногенных аварий. С вводом риск-ориентированного подхода точность оценки риска является крайне важной, что, в свою очередь, зависит от корректно определенного ресурса безопасной эксплуатации и предельного состояния оборудования. В связи с этим существует необходимость в развитии теоретической базы и современных методов прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оборудования.

Существующие подходы к обеспечению требований промышленной безопасности, основанные только на строгом выполнении норм, правил и инструкций, изложенных в нормативных документах различного уровня, не имеют необходимой эффективности. Используемые методы определения ресурса безопасной эксплуатации и оценки риска не учитывают постоянно изменяющийся во времени нестационарный случайный характер производственных процессов, фактические индивидуальные особенности оборудования и их системные взаимосвязи. Таким образом, актуально повышение точности определения ресурса безопасной эксплуатации оборудования оболочкового типа и соответствия фактической ситуации, что приведет к снижению эксплуатационных рисков.

Объекты нефте-, газоперерабатывающей промышленности характеризуются постоянной интенсификацией технологий, связанной с возрастанием температуры и давления, укрупнением единичных мощностей установок и аппаратов, наличием в них больших запасов взрыво-, пожаро- и токсикоопасных веществ. Оболочковые конструкции составляют значительную

часть оборудования нефтегазовых комплексов, участвующих в транспортировании, хранении и переработке. В связи с этим особо актуальна разработка метода прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации именно данного типа оборудования.

Неизбежное появление погрешностей геометрических параметров в ходе технологического процесса изготовления, а также возможные несоответствия фактических характеристик материала проектным данным приводят к появлению не исследованных ранее отклонений. Классическим расчетным методом определить влияние этих факторов на напряженное состояние весьма сложно, поэтому они, как правило, не учитываются, но могут значительно менять сценарий развития аварии. За счет неправильного конструирования или искажения геометрии оболочки на начальных этапах жизненного цикла при эксплуатации возникают два варианта развития событий: ремонт, если диагностическими средствами удастся оценить возможное предельное состояние, или авария. Оба варианта ведут к финансовым затратам, но второй вариант таит в себе риск гибели людей.

В эпоху массовой цифровизации промышленности и применения компьютерных технологий, перспективной разработкой для повышения уровня обеспечения промышленной безопасности является применение цифрового двойника и цифровых моделей. Цифровые модели, основанные на современных программных продуктах, позволяют качественно оценить фактическое состояние оборудования на протяжении всего жизненного цикла, что делает его эффективным инструментом управления.

Таким образом, совершенствование метода прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций опасных производственных объектов посредством создания цифровой модели является актуальной темой для исследования.

Степень разработанности

Опыт зарубежных ученых в области исследования и эффективного внедрения цифровых двойников в промышленность представлен в работах M. Grieves, Weiran Liu, F. Tao, Qinglin Qi, He Zhang, E. Glaessgen, K. Reifsnider, D. Stragel, E. Tuegel. Известно применение цифровых двойников в

автомобилестроении, что представлено в работах отечественно ученого А.И. Боровкова. В нефтегазовой отрасли цифровые двойники и цифровые модели, как правило, применяются в сфере добычи углеводородов для контроля и управления технологическими процессами.

Результаты исследований влияния на ресурс безопасной эксплуатации оборудования изменений механических характеристик материала и появлений дефектов в процессе эксплуатации представлены в трудах Н.А. Махутова, В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, А.А. Шанявского, В.М. Горицкого, С.Л. Голофаства и других.

Цифровые модели, разработанные с учетом технологических отклонений и фактических индивидуальных особенностей оборудования в целях прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации, ранее не создавались.

Актуальность и важность представленных исследований подтверждается участием автора в выполнении научно-технических программ РФФИ, договор № 20-38-90115/20.

Цель работы – совершенствование метода прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций посредством создания цифровой модели.

Задачи исследования

1 Анализ статистических данных по аварийности и причинам их возникновения на опасных производственных объектах. Анализ современных методов оценки рисков в нефтегазовой промышленности, методов прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций.

2 Разработка и изготовление опытного стенда моделирования аварийного разрушения спроектированных и изготовленных оболочковых конструкций при нагружении внутренним давлением.

3 Создание цифровых моделей с учетом индивидуальных особенностей исследуемых оболочковых конструкций для оценки потенциальных зон возникновения дефектов. Верификация цифровой и стендовой моделей.

4 Определение влияния индивидуальных отклонений оборудования от проектного решения на предельное состояния с целью оценки эксплуатационных рисков.

Научная новизна

1 В целях предотвращения возникновения аварийных ситуаций созданы цифровые модели оболочковых конструкций, учитывающие фактические геометрические параметры и механические характеристики, позволяющие прогнозировать их предельное состояние и определять зоны зарождения дефекта с погрешностью до 4% на всех этапах жизненного цикла.

2 Разработана трехпараметрическая диаграмма предельных состояний оболочек, позволяющая оценить реальные уровни эксплуатационных рисков с учетом изменения геометрии конструкции и свойств конструкционного материала в процессе эксплуатации опасного производственного объекта, в целях обеспечения безопасности производства.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании влияния индивидуальных особенностей оборудования, а именно технологических отклонений геометрических характеристик и отличий фактических свойств материала от проектных данных, на параметры предельного состояния оборудования и ресурса безопасной эксплуатации.

Практическая значимость работы заключается в разработке нового подхода к прогнозированию ресурса безопасной эксплуатации оболочковых аппаратов, который послужил основой стандарта ФГБОУ ВО «УГНТУ» СТО УГНТУ-2021 «Метод прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций нефтегазовых технологий и определения потенциально опасных зон посредством создания цифровой модели». Метод применяется в ООО НПО «ОргНефтеГаз» при разработке проектной документации. Полученные результаты применяются в учебном процессе при чтении лекций по дисциплинам «Физические основы природы разрушения конструкционных материалов» и «Основы нефтегазового дела» в ФГБОУ ВО «УГНТУ».

Методология и методы исследования

Теоретическое и экспериментальное решение задач осуществлено при помощи стандартных и современных перспективных методик, методов статистической обработки данных, современных программных комплексов

численного моделирования методом конечных элементов, систем компьютерного и физического моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1 Результаты комплексных исследований физического и численного моделирования аварийного разрушения изготовленных по индивидуальному проекту экспериментальных оболочковых конструкций.

2 Конечно-элементная численная модель оболочковых конструкций, разработанная с учетом технологических отклонений, позволяющая определить место зарождения дефекта. Верификация цифровых моделей.

3 Усовершенствованный метод прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций, позволяющий определить прогнозируемое место зарождения дефекта, посредством создания цифровой модели.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность результатов работы подтверждается верификацией результатов, полученных при численных и физических экспериментах. Использованное при исследовании оборудование прошло государственную поверку. Программный комплекс ABAQUS удовлетворяет международным стандартам качества ISO-9001 и NQA (Nuclear Quality Assurance).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли» (Уфа, 2019); International University Science Forum «Science. Education. Practice» (Торонто, Канада, 2020); XXV Международной научно-практической конференции «Инновационные исследования как локомотив развития современной науки: от теоретических парадигм к практике» (Москва, 2020); XVII Международной научно-технической конференции «Наука. Образование. Производство в решении экологических проблем» (Уфа, 2021).

Соответствие паспорту специальности

Тема и содержание исследований соответствуют паспорту специальности 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность (нефтегазовая отрасль), а

именно пункту 13 «Разработка методов оценки и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации технических устройств сложных технических систем опасных производственных объектов».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 5 в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в Перечень ВАК Минобрнауки России, 2 в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 136 наименований и приложения. Работа изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 30 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, обозначены основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

В **первой главе** представлен анализ статистических данных аварий и причин их возникновения, обзор современных методов оценки риска и прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оборудования, а также опыт использования цифровых двойников в промышленности.

Анализ статистических данных позволил сделать выводы, что большое количество аварий приходится на оборудование оболочкового типа. Оно обладает высоким аварийным потенциалом, так как в нем обращается большое количество пожароопасных и взрывоопасных веществ. В период с 2016г. по 2020г. при эксплуатации оборудования, работающего под избыточным давлением, произошло 23 аварии, унёсшие 15 жизней. К основным причинам аварий относят низкое качество проведения обслуживания и экспертизы промышленной безопасности, образование дефектов в процессе эксплуатации и

эксплуатацию оборудования за пределами разрешенных сроков. Как правило, на этапе технического диагностирования особое внимание уделяется местам приварки патрубков и ремонта, таким образом, исследуются не все критические участки оборудования, что в дальнейшем приводит к негативным последствиям. Не учитывается тот факт, что формирование дефектов происходит в зоне высоких напряжений, которая может образоваться и ввиду индивидуальных геометрических особенностей оборудования.

При прогнозировании ресурса безопасной эксплуатации и оценки риска используют три основных подхода: использование статистических данных, прогнозирование частоты событий с применением построения деревьев отказов, использование мнений экспертов. Применяемые подходы не позволяют учесть все факторы, влияющие на обеспечение безопасной эксплуатации опасного производственного объекта, что делает необходимым применение индивидуального подхода при прогнозировании ресурса безопасной эксплуатации.

Каждое эксплуатирующееся в нефтегазовой промышленности оборудование индивидуально ввиду отличий конструкционного материала, геометрических характеристик, реализующихся технологических процессов, внутренних устройств, это способствует большому разбросу статистических данных. Как правило, при расчетах не учитываются неоднородность толщины стенки, отклонения геометрических характеристик оболочки, образующиеся на этапе изготовления, несоответствие фактических свойств материала проектным данным и влияние этих факторов на предельное состояние. Прогнозирование ресурса осуществляется по установленному доминирующему механизму повреждения. Остаточный ресурс сосудов и аппаратов определяется исходя их условий:

– статической прочности с учетом фактических минимальных значений толщин стенок элементов сосудов, размеров и расположения выявленных дефектов, результатов изменения свойств металла;

– долговечности по допускаемому числу циклов нагружения для сосудов и аппаратов, работающих в условиях циклического нагружения;

– живучести несущих элементов конструкции по результатам определения величины дефектов, выявленных методами неразрушающего контроля, и сопоставления их с предельно допустимыми значениями.

Цифровой двойник является последователем имитационного моделирования. Это виртуальный представитель оборудования, который хранит, собирает, анализирует информацию на протяжении всего жизненного цикла объекта, изменяется вслед за прототипом и основывается на максимально актуализированной цифровой модели. Опыт применения цифрового двойника в других отраслях промышленности способствует внедрению этой технологии и в нефтегазовую отрасль. Известен опыт и перспективы применения цифровых двойников на стадии добычи нефти для повышения эффективности управления, создания цифрового двойника завода как системы предиктивной аналитики для обучения операторов. Это позволяет сделать вывод, что цифровые модели оболочек с высокой точностью и учетом рассматриваемых отклонений от проектных данных ранее не создавались, но представляют интерес в вопросах обеспечения промышленной безопасности.

Во **второй главе** приведены данные по объекту исследования и выбранным подходам к исследованию.

Объектом для исследования и создания цифровой модели выбрана оболочковая конструкция. Применяемые в промышленности оболочки имеют существенные размеры, что усложняет процесс их исследования и создания цифровой модели. В связи с этим в данной работе спроектированы и изготовлены цилиндрические оболочки небольшого размера. Конструкция позволяет в полной мере исследовать оборудование оболочкового типа, применяемое в промышленности. Изготовленные по одному и тому же проекту аппараты имеют индивидуальные отклонения от проекта. Они могут быть как значительные, например другая марка стали или толщина, так и

незначительные, например технологические отклонения в пределах плюсового минусового допуска.



Рисунок 1 – Изготовленные экспериментальные оболочки

Конструкционный материал всех элементов – сталь 09Г2С. Цилиндрическая обечайка $\varnothing 108 \times 6$ мм выполнена согласно ГОСТ 32678-2014, днища $\varnothing 108 \times 8$ мм выполнены согласно ГОСТ 17379-2001. Патрубки выполнены из трубы $\varnothing 22 \times 5$ мм. Изготовленные экспериментальные оболочки представлены на Рисунке 1.

Особое внимание в диссертационной работе уделялось обечайкам оболочковых конструкций. Были созданы цифровые модели цилиндрической части оболочек с целью определения индивидуальных показателей напряженного состояния каждого

отдельного объекта, его отличия от проектного решения и влияния особенностей на предельное состояние. В основе цифрового двойника лежит практика проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа на основе CAD/CAM/CAE-систем. На этапе создания проекта для разработки эскиза и технологических чертежей был выбран отечественный продукт – КОМПАС. Актуализированная численная модель была разработана в программном комплексе Fusion 360 от Autodesk. Он позволяет в полной мере отразить все особенности геометрических параметров по результатам выполненных замеров реального физического объекта. Расчеты проведены в программном комплексе ABAQUS. На этапе разработки численной модели отправной точкой является идеальная оболочка, разработанная без отступлений от проектных данных. Идеальная модель позволит определить дальнейшие изменения напряженно-деформированного

состояния при наличии дефектов и отклонений параметров, путем сравнения результатов нагружения идеальной и актуализированной моделей.

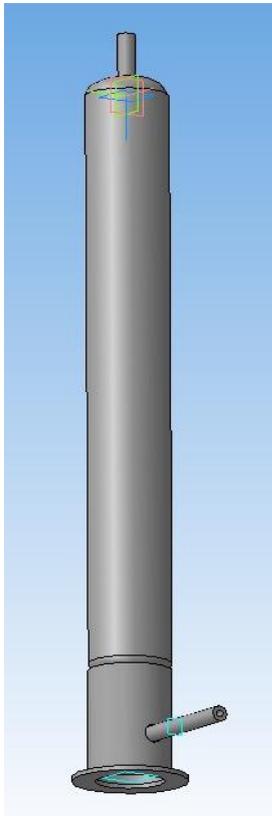


Рисунок 2 – Разработанная модель

Измеренные толщины и овальность интегрировались в модель. Для определения характера распределения исследуемых показателей, оболочки были поделены на пояса и сектора. Пояса пронумерованы от 1 по 39 с шагом 20 мм. Образующие с шагом в 45° пронумерованы от 1 до 8.

При построении моделей был выбран аналогичный подход. Каждый пояс строился по восьми опорным замерам толщины стенки с шагом по 45° .

Разработанная модель представлена на Рисунке 2. Подтверждение результатов определения предельного состояния цифровых моделей осуществлялось за счет разрушающих испытаний реальных оболочек на разработанном экспериментальном стенде. Схема установки для разрушения оболочек представлена на Рисунке 3.

Несмотря на то, что сталь 09Г2С, из которой выполнены цилиндрические оболочки, широко применяется в промышленности, и механические характеристики этой марки стали известны, они также могут варьироваться в зависимости от поставщика и партии.

В **третьей** главе представлены методы и результаты оценки соответствия реальных объектов проектному решению.

Несмотря на то, что исследуемые оболочки не находились в эксплуатации, в процессе изготовления невозможно получить идеальные значения толщины равные 6 мм, по всей поверхности без отклонений.

По результатам измерения параметров аппаратов были построены графики распределения толщины и овальности по оболочкам № 1, № 2, № 3.

Распределение толщины обечайки № 1, и овальности обечайки № 3, ввиду наибольшей наглядности распределения показателей, представлены на Рисунке 4. Каждая из оболочек была изготовлена по одному и тому же проекту, но имеет свои особенности.

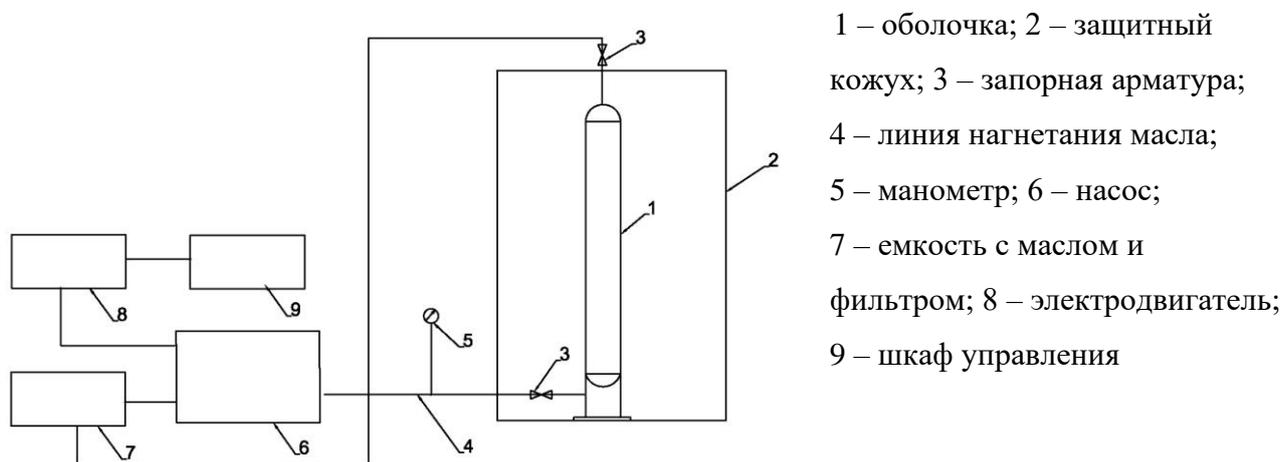


Рисунок 3 – Схема установки для разрушения оболочек

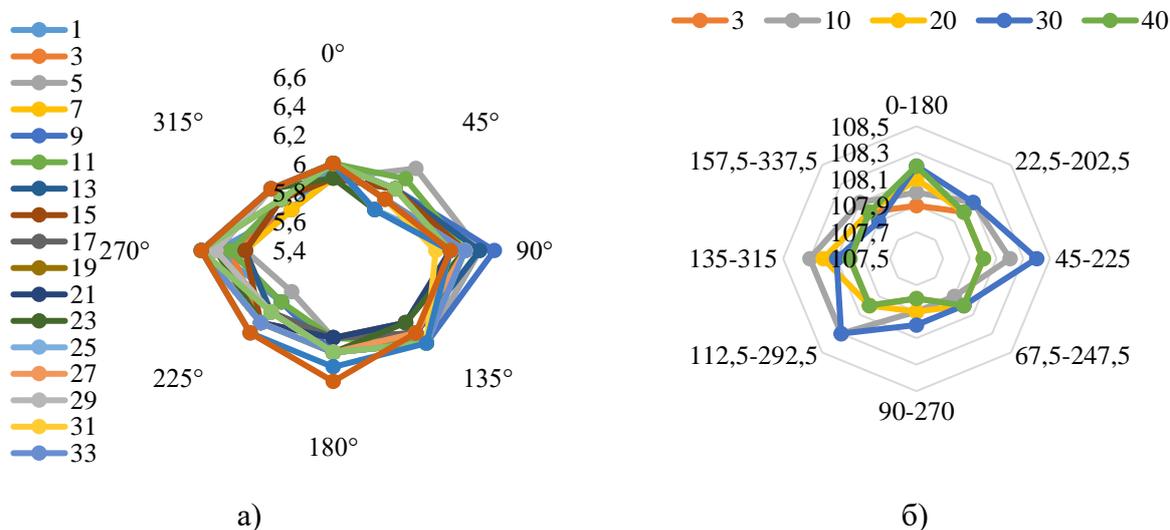


Рисунок 4 – Распределение геометрических параметров:
 распределение толщины стенки по обечайке № 1 (а),
 распределение овальности по обечайке № 3 (б)

Так как при эксплуатации механические характеристики материала претерпевают изменения, накапливаются повреждения, происходят

необратимые изменения структуры из-за сдвиговых процессов внутри зерен, то фактические предел прочности и предел текучести для цифровой модели определены в ходе испытания на растяжение. Испытания проводились на плоских образцах, выполненных из фрагмента трубы, послужившей обечайкой, на разрывной машине INSTRON 8801 согласно ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). Фотографии образца до разрушения и после представлены на Рисунке 5.

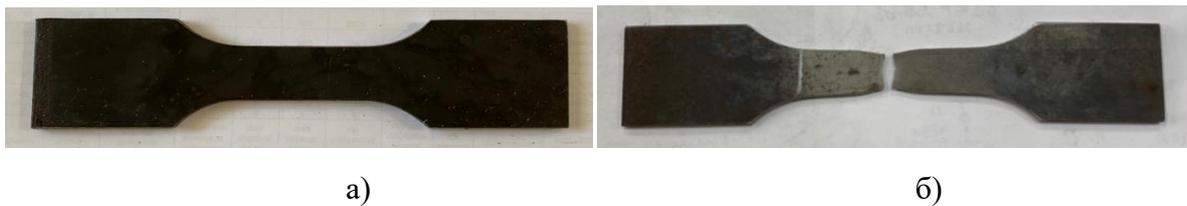


Рисунок 5 – Образец для определения механических характеристик основного металла до разрушения (а) и после (б)

В работе наибольший интерес представляет влияние технологических отклонений на предельное состояние обечаек и ресурс безопасной эксплуатации.

В основе цифровой модели лежит актуализированная, построенная по фактическим характеристикам численная модель. Реалистичность поведения цифровой модели при нагружении оболочки внутренним давлением в большей степени зависит от адекватности поведения модели материала. С этой целью в программном комплексе ABAQUS был смоделирован эксперимент по растяжению металлических образцов, идентичных реально изготовленным. В процессе физического и численного экспериментов получены практически идентичные диаграммы растяжения (Рисунок б), что свидетельствует об адекватности разработанной модели материала и возможности ее дальнейшего использования для цифровой модели оболочек.

В **четвертой** главе представлены результаты разрушающих испытаний физических и численных моделей, усовершенствован метод прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации.

Для прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации важно определение фактического предельного состояния оборудования с учетом всех особенностей, которые могут значительно снизить его по сравнению с проектом. Предельное давление, необходимое для разрушения оболочки, было получено тремя способами, а именно расчетным методом, путем нагружения цифровой модели и экспериментальным путем. Модель нагружения соответствует нагружению на экспериментальном стенде. При наличии температурного влияния, особенностей течения среды или закрепления оборудования необходимо разработать иную модель нагружения.

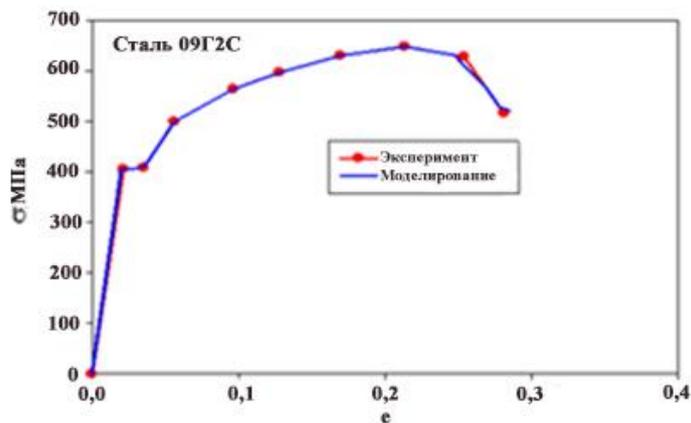


Рисунок 6 – Диаграмма растяжения образца по результатам физического и численного растяжения

Теоретическое значение внутреннего давления, необходимого для достижения предела прочности оболочки и дальнейшего разрушения при нормативных механических характеристиках материала, составляет 47,5 МПа. При фактических механических характеристиках материала предельное давление составляет 56,8 МПа. Различие значений внутреннего давления, необходимого для разрушения обечайки при нормативных и фактических данных составило 20 %. Соответственно дальнейшее определение ресурса безопасной эксплуатации оборудования и оценка риска будут не корректны.

Разрушение цифровых моделей обечаек позволяет определить прогнозируемое место разрушения реальной оболочки, ее предельное состояние, сформировать карту напряжений и разработать предупреждающие мероприятия. Разрушение цифровой модели идеальной обечайки произошло при 55 МПа. Разрушение не имеет начальной локализации ввиду отсутствия концентраторов напряжения. Результаты экспериментов по разрушению реальных и цифровых оболочек представлено в Таблице 1.

Таблица 1 – Результаты разрушающих испытаний оболочковых конструкций

№ Оболочки	Предельное давление, зона разрушения	
	Физический эксперимент	Численный эксперимент
Оболочка №1	56 МПа, образующая 315°, 27–37 пояс	54 МПа, образующая 315°, 27–37 пояс
Оболочка №2	52,5 МПа, образующая 315°, 19-24 пояс	53 МПа, образующая 315°, 19-24 пояс
Оболочка №3	54,5 МПа, образующая 180°, нижняя часть оболочки	56 МПа, образующая 180°, нижняя часть оболочки

На Рисунках 7-9 представлены результаты разрушения обечаек оболочек № 1-№3.

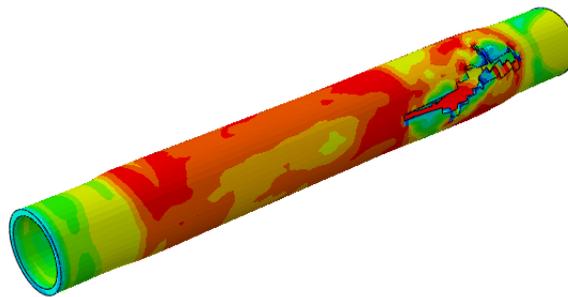


Рисунок 7 – Результаты разрушения обечайки № 1

В результате толщинометрии второй оболочки был обнаружен участок с локальным уменьшением толщины стенки, что послужило концентратором напряжения для образования трещины. Местоположение и форма трещины в полученных результатах совпадают.

Выявление зон концентрации напряжения позволяет прогнозировать места разрушения, обнаруживать их на этапе диагностирования, тем самым

повышая качество технического обслуживания и прогнозирования ресурса. Пример карты распределения напряжения по обечайке оболочки №2 представлен на Рисунке 10. На Рисунке зона максимальных напряжений соответствует зоне разрушения, таким образом, применение данного подхода позволит предупредить отказы оборудования.

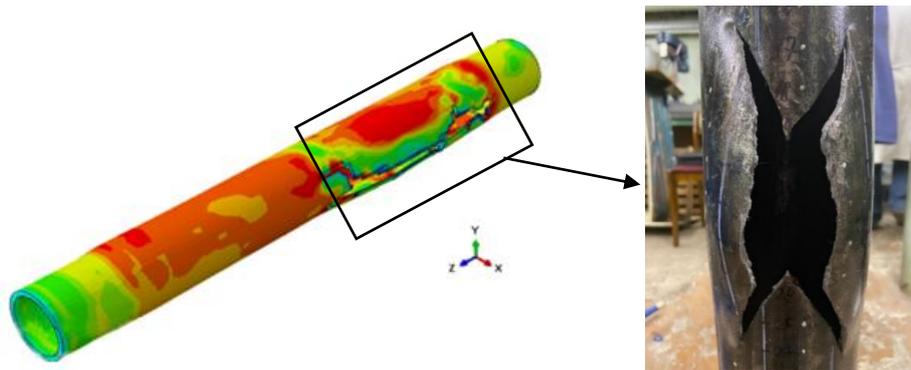


Рисунок 8 – Результаты разрушения обечайки № 2

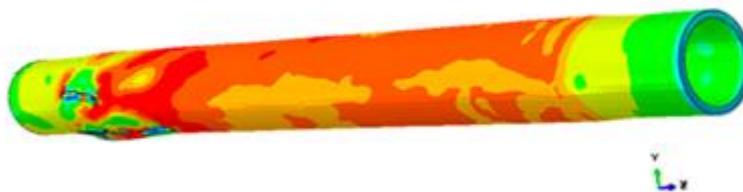


Рисунок 9 – Результаты разрушения обечайки № 3

Разработан коэффициент снижения предельного давления K_p , определяемый как отношение фактического предельного давления при влиянии того или иного фактора к проектному предельному давлению, то есть давлению разрушения идеальной цифровой модели:

$$K_p = R_f/R_i, \text{ при } R_f < R_i; \quad (1)$$

$$K_p = 1, \text{ при } R_f \geq R_i, \quad (2)$$

где R_f – фактическое давление разрушения обечайки;

R_i – давление разрушения идеальной обечайки.

Рассмотрены модели с утонением на 10 %, 20 % и 30 %, произвольно распределенным по площади обечайки, с различной степенью овальности и изменяющимися механическими характеристиками. Результаты расчетов представлены в Таблицах 2–4. По полученным данным построены графики изменения K_p , точками на графике отмечены фактические параметры исследуемых оболочек (Рисунок 11).

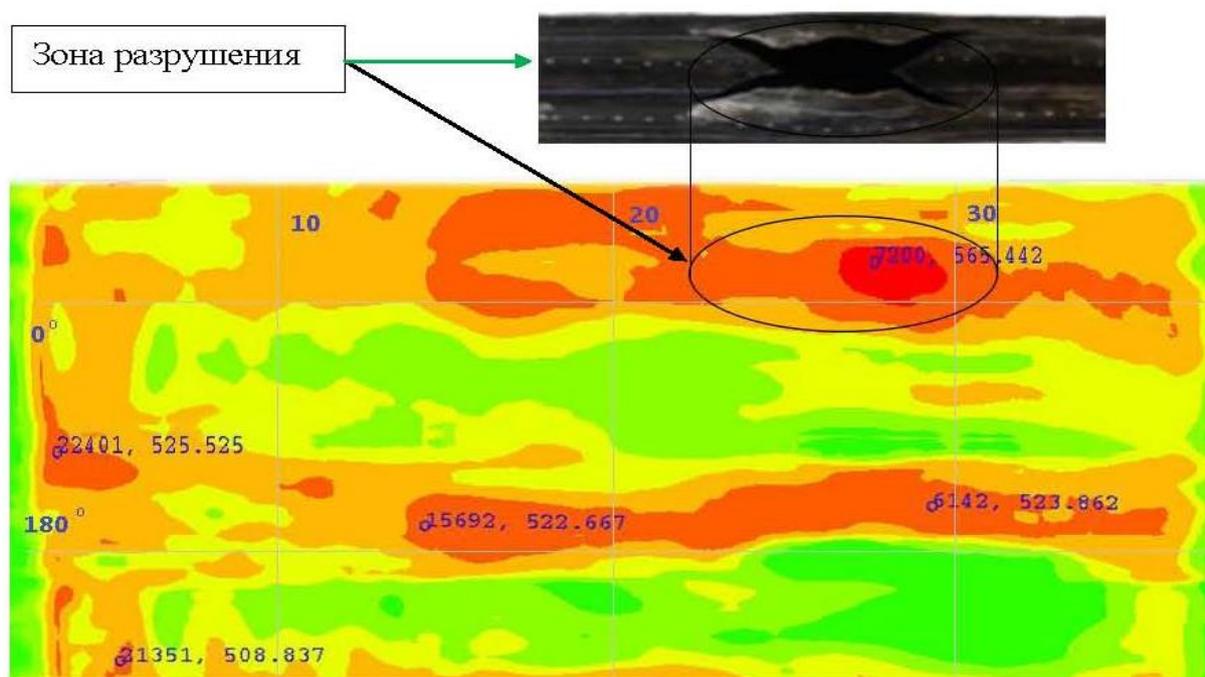


Рисунок 10 – Карта распределения напряжения по обечайке оболочки №2

Таблица 2 – Коэффициент снижения предельного давления при утонении 10 %

	Процент точек построения с утонением									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
$K_{п10}$	0,99	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,92

Таблица 3 – Коэффициент снижения предельного давления при утонении 20 %

	Процент точек построения с утонением									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
$K_{п20}$	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,93	0,92	0,91	0,91	0,89

Таблица 4 – Коэффициент снижения предельного давления при утонении 30 %

	Процент точек построения с утонением									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
$K_{п30}$	0,92	0,91	0,91	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,86	0,86

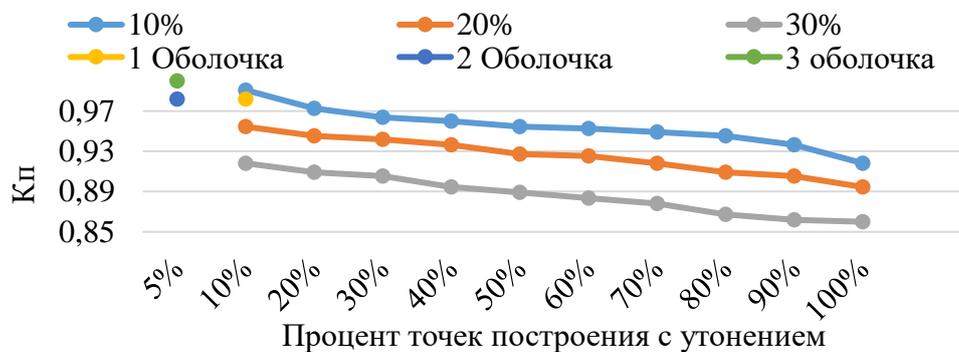


Рисунок 11 – Изменение коэффициента снижения предельного давления при различных параметрах построения модели

Отличие фактических механических характеристик от нормативных может привести к значительным изменениям предельного давления. На Рисунке 12 представлена точечная диаграмма изменения предельного давления оболочек № 1, № 2, № 3 в зависимости от изменения свойств материала производителей.

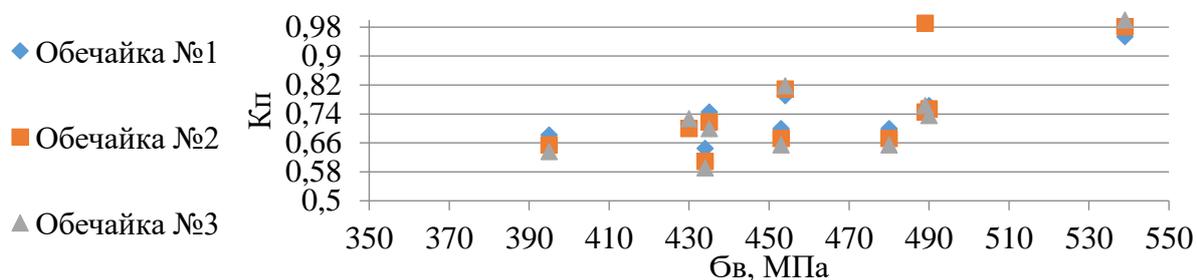


Рисунок 12 – Изменения предельного давления обечаек в зависимости от механических характеристик материала

Остаточный ресурс определяется достижением оборудования его фактического предельного состояния, полученного с учетом влияния индивидуальных особенностей. Постоянная адаптация цифровой модели по фактическому состоянию реального прототипа на всех этапах жизненного цикла позволяет получать актуальные изменения параметров его технического состояния и моделировать аварийное разрушение в целях его предупреждения. Прогнозируемый ресурс определяется путем экстраполяции фактических показателей параметров наблюдения до предельных значений, а также определением опасной зоны для организации мероприятий, обеспечивающих безопасность производства. Усовершенствованный метод прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций представлен на Рисунке 13.

С целью определения совокупного влияния изменений геометрии и свойств конструкционного материала на ресурс безопасной эксплуатации оболочек и оценку реальных уровней эксплуатационных рисков была разработана трехпараметрическая диаграмма предельных состояний.

Каждая ось характеризуется проекцией вектора $D_{КП(о,с,у)}$, отражающая отклонения от проекта при изменении рассматриваемого фактора:

$$D_{КП(о,с,у)} = 1 - K_{п(о,с,у)}, \quad (3)$$

где $K_{по}$ – коэффициент снижения давления при овальности;

$K_{пу}$ – коэффициент снижения давления при утонении;

$K_{пс}$ – коэффициент снижения давления с учетом отклонения механических характеристик от проектного значения.

Величина коэффициента $D_{КП(о,с,у)}$ отражает неучтенные при проектировании особенности оборудования, следовательно, качественно характеризуют риск наступления отказа. Если результирующий коэффициент, определенный по трехпараметрической диаграмме предельных состояний, или один из полученных показателей выходит за определенную безопасную

область, определенную с учетом коэффициента запаса прочности, то разрушение оболочки неизбежно:

$$[D_{кпо}] \leq 0,41; [D_{кпу}] \leq 0,41; [D_{кпс}] \leq 0,41 \quad (4)$$

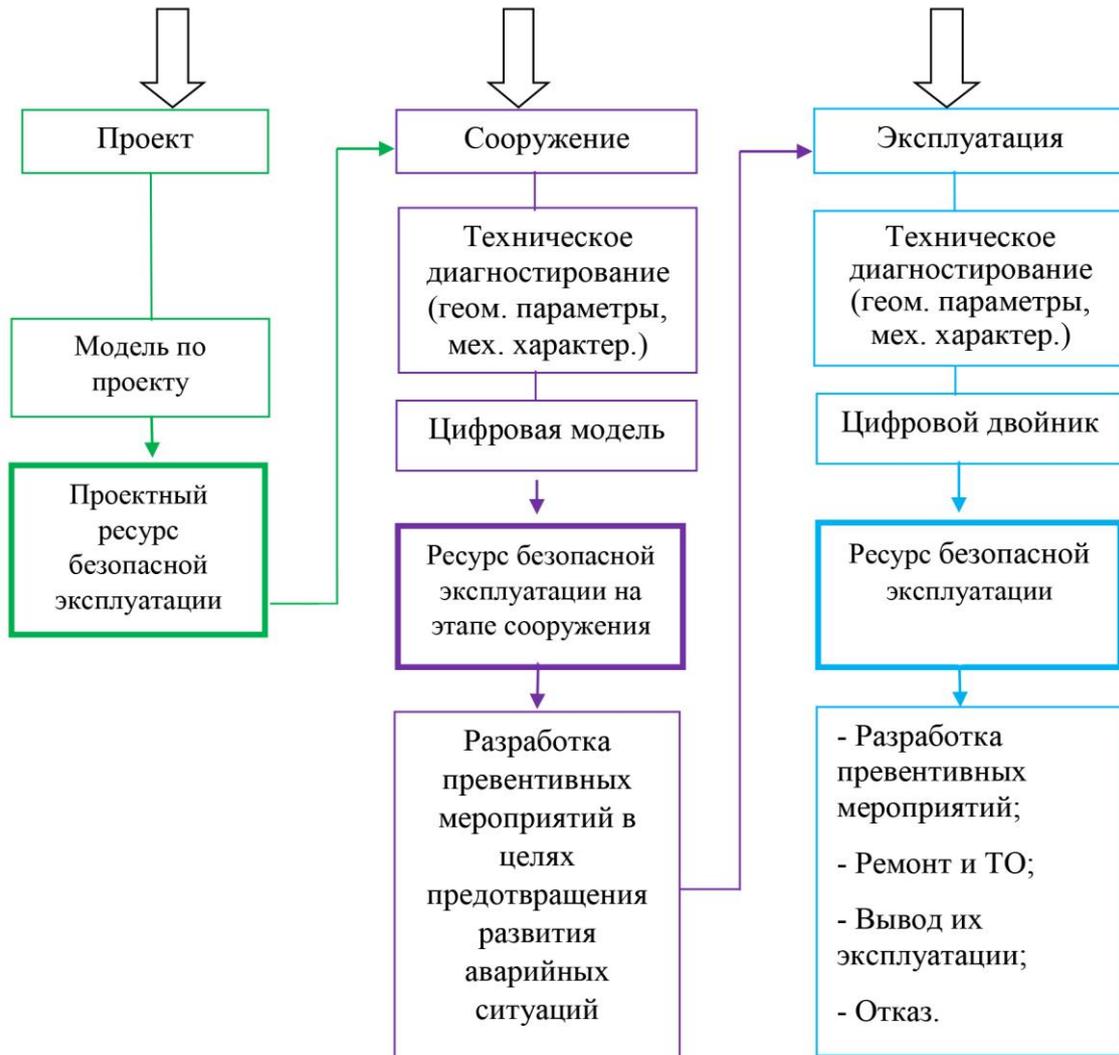


Рисунок 13 – Усовершенствованный метод прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций

Применение полученного результирующего отклонения позволит определить фактическое предельное проектное давление $P_i'(5)$, которое определено по каждой оболочке путем разрушения цифровой модели, а также допускаемое давление $[P_i']$ с учетом коэффициента запаса прочности.

Превышение допустимого давления в процессе эксплуатации приведет к разрушению (6):

$$P_{и'} = P_{и} \cdot D_{кп}; \quad (5)$$

$$P / [P_{и'}] < 1 \quad (6)$$

Полученная трехпараметрическая диаграмма предельных поверхностей представлена на Рисунке 14.

В случае второй оболочки при $K_{пс} = 0,98$, $K_{пу} = 0,95$, $K_{по} = 0,98$ результирующий $D_{кп} = 0,05$. Предельный ресурс отличается от идеального проектного случая на 5 %. Давление разрушения с учетом отклонений от идеального давления, равного 55 МПа, составляет 52,25 МПа, что и было получено в ходе эксперимента. Это, в свою очередь, ведет к повышению риска аварии ввиду некорректной оценки фактического состояния оборудования.

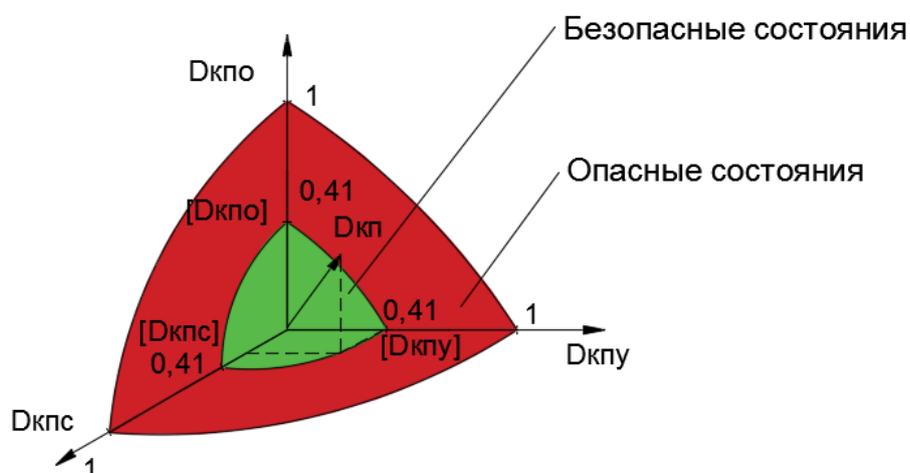


Рисунок 14 – Объемная трехпараметрическая диаграмма предельных состояний, зона безопасной эксплуатации оболочкового оборудования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Усовершенствован метод прогнозирования ресурса безопасной эксплуатации оболочковых конструкций посредством создания цифровой модели. Он позволяет оценить фактические параметры технического состояния

оборудования, прогнозировать его ресурс по достижению предельного состояния и место формирования критического дефекта, что способствует предотвращению аварийных ситуаций.

2 Проведенный анализ статистических данных по динамике аварийности сосудов высокого давления показал необходимость повышения качества технического диагностирования и применения цифровых технологий для прогнозирования ресурса их безопасной эксплуатации с учетом индивидуальных особенностей оборудования.

3 На разработанном экспериментальном стенде проведены разрушающие испытания спроектированных и изготовленных по индивидуальному проекту оболочковых конструкций и получены зоны их фактического разрушения.

4 Созданы цифровые модели оболочковых конструкций с учетом отклонений толщины стенки, овальности и механических характеристик от проектного решения. Результаты численного эксперимента по нагружению оболочек показали соответствие лабораторному эксперименту с погрешностью результатов до 4 %.

5 Определено, что в зависимости от отклонений геометрических и механических характеристик от проектного решения фактическое предельное давление оболочки может быть на 40 % меньше. Для оценки эксплуатационных рисков опасного производственного объекта с учетом их индивидуальных особенностей разработана трехпараметрическая диаграмма предельных состояний оболочковых конструкций.

Основные положения диссертации опубликованы в 12 научных изданиях, наиболее значимые из которых:

- в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1. Абдрахманова, К. Н. Обзор современных программных комплексов и концепции цифрового двойника для прогнозирования аварийных ситуаций на объектах нефтегазовой отрасли / К. Н. Абдрахманова, А. В. Федосов, К. Р. Идрисова, И. Р. Даниева, Р. Р. Валеева // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2020. – № 3. – С. 71–91.

2. Абдрахманова, К. Н. Моделирование влияния на напряженное состояние утонения толщины стенки оболочки при коррозионном разрушении / К. Н. Абдрахманова,

Е. В. Ярмонов, П. А. Кулаков, Р. Р. Тляшева // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2020. – № 6. – С. 15–31.

3. Абдрахманова, К. Н. Современные методы диагностики магистральных трубопроводов и перспективы применения цифровых технологий / К. Н. Абдрахманова, Ю. Ю. Петицкая, Р. Ф. Алянин, Д. Ю. Валекжанин // Проблемы сбора, подготовки и транспортирования нефти нефтепродуктов. – 2021. – Вып. 1 (129). – С. 100–110.

4. Абдрахманова, К. Н. Прогнозирование предельного состояния обечаек аппаратов на основе цифровых моделей / К. Н. Абдрахманова // Проблемы сбора, подготовки и транспортирования нефти и нефтепродуктов. – 2021. Вып. 5 (133). – С.112–120.

- в рецензируемых научных изданиях, включенных в международные базы данных Scopus и Web of Science

5. Abdrakhmanova, K. N. Review of Modern Software Complexes and Digital Twin Concept for Forecasting Emergency Situations in Oil and Gas Industry / K. N. Abdrakhmanova, A. V. Fedosov, K. R. Idrisova, N. Kh. Abdrakhmanov // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering. – 2020. – P. 1–8.

6. Abdrakhmanova, K. Modeling the Impact of Shell Wall Thickness Thinning on the Stress State / K. Abdrakhmanova, E. Yarmonov, P. Kulakov, R. Tlyasheva // Journal of Physics : Conf. Series. – 2021. – P. 1–8.

- в прочих изданиях:

7. Абдрахманова, К. Н. Применение цифрового двойника в целях обеспечения промышленной безопасности в нефтегазовой отрасли / К. Н. Абдрахманова // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли : матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2019. – С. 2.

8. Abdrakhmanova, K. N. Possibilities of an Object Digital Twin Application in Order to Extend and Predict Safe Operation Resource / K. N. Abdrakhmanova // Science. Education. Practice : materials of the International University Science Forum, April 22, 2020. – 2020. – P. 182–186.

9. Абдрахманова, К. Н. Перспективы применения цифрового двойника при техническом обслуживании оборудования в целях прогнозирования и продления ресурса безопасной эксплуатации / К. Н. Абдрахманова // Инновационные исследования как локомотив развития современной науки : от теоретических парадигм к практикам : электрон. сб. науч. ст. по матер. XXV Междунар. науч.-практ. конф. – М. : НИЦ МИСИ, 2020. – С. 817–824.