

На правах рукописи



ИЛЬЯСОВА АЙГУЛЬ ИРИКОВНА

**ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОГО РИСКА МАГИСТРАЛЬНОГО
ГАЗОПРОВОДА С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВНУТРИТРУБНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ**

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
Наумкин Евгений Анатольевич

Официальные оппоненты: **Щипачев Андрей Михайлович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
горный университет» / кафедра
«Транспорт и хранение нефти и
газа», заведующий кафедрой

Загидулин Тимур Ринатович
кандидат технических наук
ООО «Научно-технический центр
«Спектр» / технический директор

Ведущая организация – Общество с ограниченной
ответственностью «Центр
исследований экстремальных
ситуаций» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «15» 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

На сегодняшний день объём добычи природного газа в Российской Федерации составляет более 600 млрд м³ в год. Протяженность магистральных газопроводов в России составляет более 160 тыс. км. Специфика эксплуатации трубопроводного транспорта напрямую связана с риском каскадного развития аварий на многониточных системах транспорта газа, поэтому своевременное определение потенциально опасных зон имеет огромное значение для энергетической безопасности страны. С целью выявления дефектов в магистральных газопроводах одним из эффективных диагностических методов является внутритрубная магнитная дефектоскопия (ВМД), которая заключается в намагничивании стенки трубопровода снарядами-дефектоскопами при помощи постоянных магнитов, размещённых на цилиндрическом ярме, и гибких металлических щёток, передающих магнитный поток от магнитов в стенку трубы. ВМД имеет ряд преимуществ, из которых важнейшими являются быстрота диагностирования, возможность проведения, не останавливая процесс транспортировки, достоверные данные и др. Однако после проведения магнитной дефектоскопии материал газопровода работает в намагниченном состоянии в условиях циклического нагружения.

Существует ряд публикаций, описывающих влияние магнитного поля на механические характеристики металла, но нет единого мнения о том, как изменяется долговечность. В одних источниках описываются исследования, в которых регистрируется увеличение механических характеристик и долговечности, другие утверждают о негативном действии магнитного поля, поэтому данный вопрос требует дополнительных исследований.

Следует отметить, что магистральные газопроводы относятся к критически важным объектам, поэтому для них необходимо обеспечение защищенности, которая оценивается по критериям риска. При расчете вероятности возникновения риска аварий рекомендуется использовать метод анализа деревьев событий, точность которого зависит от того, насколько учтены факторы

в дереве событий, влияющие на отказ оборудования. Следовательно исследования, направленные на оценку техногенного риска линейной части магистрального газопровода с учетом изменений механических характеристик и долговечности, вызванных последствиями намагничивания металла при магнитной дефектоскопии, являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования

Изучение анализа риска в нашей стране связано с именами В. А. Акимова, В. Т. Алымова, П. Г. Белова, В. А. Котляревского, И. Р. Кузеева, М. В. Лисанова, Н. А. Махутова, В. В. Москвичева, А. С. Печеркина, Р. Р. Тляшевой, N. J. Bahr и др. Количественный метод анализа риска исследован Р. Н. Алымовым, А. М. Козлитиним и др.

Изучением закономерностей изменения магнитных свойств металлов при воздействии механических нагрузок, а также при наличии дефектов занимались Л. Л. Афремов, Э. С. Горкунов, А. А. Дубов, В. Ф. Мужичкий, А. В. Панов, W. F. Brown Jr., Y. Shindo и др.

Однако изменения механических свойств материала газопровода, возникающие после намагничивания постоянным магнитным полем, не рассматривались в расчетах риска возникновения аварии.

Соответствие паспорту заявленной специальности

Тема работы и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности, а именно пункту 14 «Совершенствование методов обеспечения безопасности при техническом обслуживании, ремонте и эксплуатации транспортных средств, разработка методических принципов сертификации транспортных средств по критериям безопасности».

Цель работы

Повышение безопасности эксплуатации магистральных газопроводов путем внесения уточнений в методику расчета техногенного риска, полученного с учетом изменений долговечности, вызванных намагничиванием металла при проведении внутритрубной магнитной дефектоскопии.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1 Провести анализ факторов, вызывающих аварийное разрушение магистральных газопроводов, и существующих методов оценки технического состояния. Проанализировать существующие методы оценки техногенных рисков.

2 Установить зависимости механических характеристик и долговечности материала газопровода из стали 09Г2С от величины намагничивания постоянным магнитным полем.

3 Определить влияние длительного нагружения изгибными деформациями образца из трубной стали 09Г2С и воздействие постоянного магнитного поля на изменение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещиноподобного дефекта.

4 Провести сравнительный анализ результатов расчета техногенного риска магистрального газопровода по стандартной методике и с учетом намагничивания стенки трубы после проведения внутритрубной магнитной дефектоскопии.

Научная новизна

Установлено, что при циклическом нагружении образцов плоского типа из стали 09Г2С по схеме чистого изгиба с постоянной амплитудой деформации $\varepsilon = 0,27 \%$, находящихся под действием постоянного магнитного поля напряженностью $H = 17-25 \text{ А/см}$, количество циклов до разрушения сокращается до 24 %, это приводит к тому, что в магистральном газопроводе, изготовленном из стандартной трубы $1420 \times 16 \text{ мм}$ стали 09Г2С, относящегося к 1 классу согласно классификации газопроводов по давлению, намагничивание до технического насыщения вызывает увеличение вероятности разгерметизации на 0,3 % на каждые 1000 км трубопровода за 1 год эксплуатации.

Теоретическая значимость работы

Полученные в работе сведения о снижении усталостной долговечности, механических характеристик и увеличении коэффициента интенсивности напряжений в материале линейной части магистрального газопровода из стали 09Г2С после намагничивания до технического насыщения внутритрубным

магнитным дефектоскопом могут быть использованы при определении остаточного ресурса и при расчете техногенного риска.

Практическая значимость работы

1 Уточненный метод оценки техногенного риска линейной части магистрального газопровода принят к внедрению и применяется в ООО НТЦ «АКТАУ» при разработке декларации промышленной безопасности (Приложение А).

2 Результаты, полученные в работе, используются в процессе изучения дисциплины «Управление техносферной безопасностью» при подготовке бакалавров по направлению 20.03.01 – «Безопасность технологических процессов и производств нефтегазовой отрасли» на кафедре «Промышленная безопасность и охрана труда» ФГБОУ ВО «УГНТУ».

Методология и методы исследования

Решение поставленных задач осуществлено путем совокупности аналитических и статистических методов анализа результатов, полученных на экспериментальных стендах по испытанию материалов на статический и циклический изгиб с использованием современных приборов измерения магнитных характеристик, и теоретических расчетов оценки риска возникновения аварии.

Положения, выносимые на защиту:

1 Результаты исследований о снижении механических характеристик и усталостной долговечности материала газопровода, подверженного воздействию постоянного магнитного поля.

2 Результаты теоретических и экспериментальных исследований увеличения коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины трубы с концентратором напряжений, находящейся под действием постоянного магнитного поля и изгибных деформаций.

3 Результаты расчетов вероятности разгерметизации линейной части магистрального газопровода, находящегося в намагниченном состоянии в результате проведения внутритрубной магнитной дефектоскопии.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты и основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: XL Международная научно-практическая конференция «Advances in Science and Technology» (Москва, 2021); X Международная научно-практическая конференция «Современные технологии: проблемы инновационного развития и внедрения результатов» (Петрозаводск, 2021); XII Международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2021); XIII Международная научная конференция «Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации» (Моррисвилль, Северная Каролина, США, 2022); III Международная научно-практическая конференция «Студенческий научный форум 2022» (Пенза, 2022).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованной литературы, включающего 105 наименований. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка, 11 таблиц, 1 приложение.

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 приведены статистические данные по авариям на территории Российской Федерации объектов газораспределения и потребления. Рассмотрены основные причины их возникновения и представлена динамика аварийности на опасных производственных объектах газораспределения и

газопотребления. По истечении периода функционирования трубопровода происходит основной износ стенок и, как следствие, возникают аварийные ситуации. Согласно статистическим данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (ФСЭТАН) за 2016–2021 гг. аварийные ситуации на линейной части магистрального газопровода возникают по ряду причин (Рисунок 1).

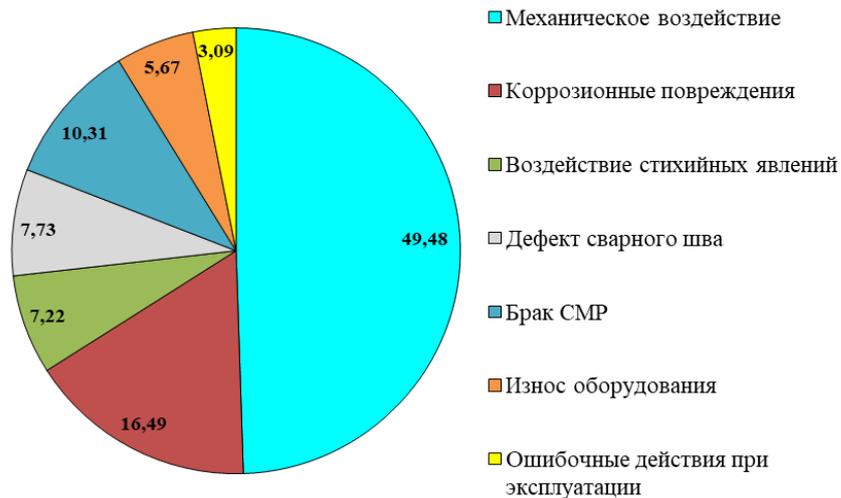


Рисунок 1 – Статистические данные по причинам аварий на линейной части магистрального газопровода за 2016–2021 гг. согласно ФСЭТАН

Снижение надежности газопровода приводит к отказу оборудования и, как следствие, к аварийным ситуациям, в связи с чем возрастает роль диагностирования.

Рассмотрены существующие методы технического диагностирования газопроводов. В настоящее время наиболее популярным и широко используемым остается метод внутритрубной магнитной дефектоскопии, позволяющий идентифицировать существенную долю опасных дефектов на газопроводах. Магнитным методом можно проинспектировать трубы значительной протяженности за короткий промежуток времени.

Внутритрубная магнитная дефектоскопия основана на регистрации локальных искажений магнитного поля, вызванных повреждениями в

намагниченном материале трубопровода и в сварных швах, предназначена для технического диагностирования, перед которым необходимо осуществлять чистку трубопровода путем пропуска очистных скребков.

Наиболее эффективным является использование комплекса магнитных дефектоскопов, имеющих продольную и поперечную схемы намагничивания относительно оси трубы. Это обусловлено тем, что поле рассеяния, регистрируемое на поверхности трубы с помощью соответствующих магнитных преобразователей (феррозондов или датчиков Холла), будет максимальным при наличии дефектов, ориентированных перпендикулярно магнитному потоку, а магнитная дефектоскопия будет иметь наибольшую чувствительность. Поэтому применение такого комплекса мероприятий позволит выявить дефекты любой ориентации.

При изучении литературных данных о влиянии магнитного поля на усталостную долговечность металлов установлено, что количество циклов до разрушения увеличилось у таких металлов, как медь, вольфрам-рений. Для образцов из алюминия разницы между количеством циклов до разрушения в намагниченном состоянии и без воздействия магнитного поля не выявлено, а образцы из свинца и сплава циркония под действием магнитного поля разрушаются быстрее. Влияние магнитного поля на низколегированные стали не изучалось, с чем и связана цель исследования.

Методы оценки техногенных рисков разрабатываются достаточно давно и учитывают специфику различных опасных производственных объектов (ОПО). Большинство методов основано на использовании статистических данных и теории вероятностей, оцениваются средние по времени и пространству характеристики ущербов, возникающих по разным техногенным причинам и от различных инцидентов. Оценивается частота или вероятность самих инцидентов, аварий, катастроф. На основе анализа существующих методик оценки риска возникновения аварий выявлено, что не одна из них не учитывает фактор намагничивания стенки газопровода при проведении внутритрубной магнитной дефектоскопии. Для расчетов был выбран стандарт СТО Газпром 2-2.3-351-2009. Данные методические указания регламентируют выполнение количественного анализа техногенного

риска эксплуатации опасных производственных объектов транспорта газа, учитывают специфику эксплуатации технологических объектов транспорта и физических особенностей протекания аварийных процессов. Однако данная методика не учитывает механических изменений материала газопровода, происходящих после прохождения магнитного дефектоскопа, что оказывает существенное влияние на точность оценки техногенного риска.

Вторая глава посвящена описанию объекта исследования, выбору материала, исследуемых параметров и применяемого оборудования.

В качестве объекта исследования выбрана линейная часть магистрального газопровода. В целях установления влияния постоянного магнитного поля на изменение механических характеристик и долговечности материала газопровода из стали 09Г2С был выполнен ряд экспериментов с использованием неодимовых магнитов N 38 напряженностью от 9,5 до 25 А/см, которые по диапазону магнитного действия подобны характеристикам дефектоскопа.

При проведении экспериментов на малоцикловую усталость использовались образцы плоского типа, которые нагружались по схеме чистого изгиба. Химический состав стали соответствует ГОСТ 19281-89 и ГОСТ 17066-94, согласно которым значение предела текучести (σ_T) должно быть не менее 345 МПа и предела прочности (σ_B) – не менее 490 МПа.

В целях создания в материале поврежденности от циклических нагрузок использована установка для усталостных испытаний. Нагружение образцов производилось по схеме чистого изгиба, при этом изначально задавалась постоянная амплитуда деформации, которая была подобрана таким образом, чтобы нагружение материала происходило в упругопластической области. Величина деформации контролировалась с помощью индикатора часового типа ИЧ-10. Частота циклического нагружения составляла 0,3 Гц для исключения критического температурного нагрева. Выбранная схема нагружения позволяет провести сравнение результатов усталостных испытаний образцов как подверженных воздействию магнитного поля, так и без намагничивания.

При проведении экспериментов также использовалось следующее оборудование: магнитометр универсальный графический ИН-01, установка для испытаний на усталость по схеме чистого изгиба, микрометр.

Следующим этапом были исследования долговечности при циклическом нагружении по схеме чистого изгиба с постоянной амплитудой деформации. Для экспериментов изготовлены плоские образцы, форма которых соответствует ГОСТ 1497-84. Распределение магнитного поля представлено на Рисунке 2. Результаты исследований представлены в Таблице 1.

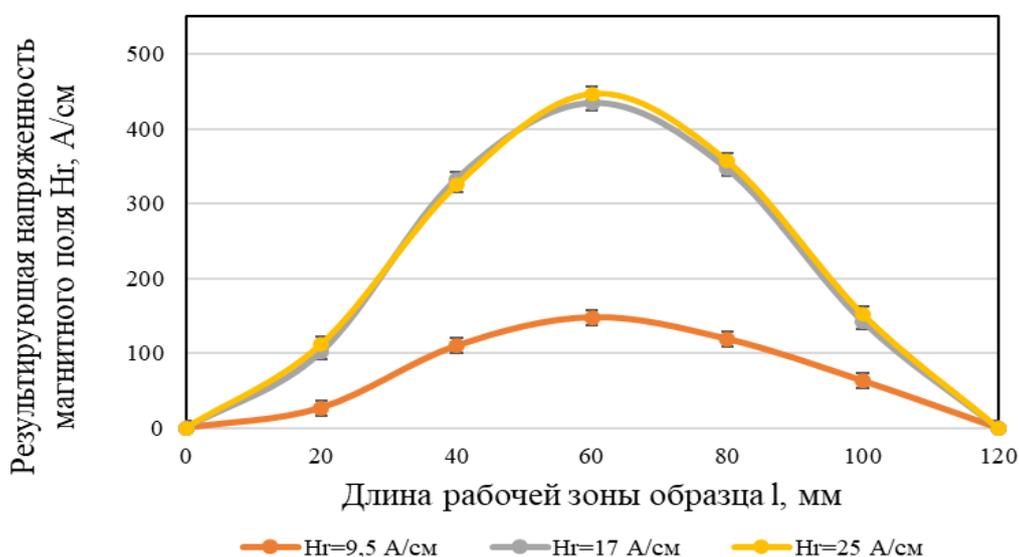


Рисунок 2 – Распределение напряженности магнитного поля по длине рабочей зоны образца при воздействии различного количества магнитов

Таблица 1 – Сводные результаты по количеству циклов до разрушения под воздействием постоянного магнитного поля

Среднее количество циклов до разрушения N_p без воздействия магнитного поля	Среднее количество циклов до разрушения N_p с воздействием магнитного поля $H = 9,5$ А/см	Среднее количество циклов до разрушения N_p с воздействием магнитного поля $H = 17$ А/см	Среднее количество циклов до разрушения N_p с воздействием магнитного поля $H = 25$ А/см
6655	5173	5113	5057

По результатам данного исследования выявлено, что при воздействии постоянного магнитного поля на испытуемые образцы количество циклов до разрушения сократилось на 24 %. Относительная погрешность составила не более 0,5 %.

Целью дальнейшего исследования было определение влияния магнитного поля на механические характеристики материала трубопровода, подверженного накоплению усталостных повреждений. В связи с этим сначала были проведены испытания по созданию в образцах плоского типа различных уровней накопления повреждений (N_i/N_p), равных 0,2; 0,4; 0,6; 0,8. При этом на испытуемые образцы оказывалось воздействие постоянного магнитного поля, в результате получено четыре группы образцов, намагниченных двумя, тремя и четырьмя неодимовыми магнитами. Полученные образцы разрушили методом статического растяжения по ГОСТ 1497, после чего определен предел прочности, предел текучести. Полученные данные были обработаны и представлены в виде гистограмм предела прочности и предела текучести образцов от уровня накопленных усталостных повреждений для намагниченного состояния и без магнитного воздействия (Рисунки 3–4).

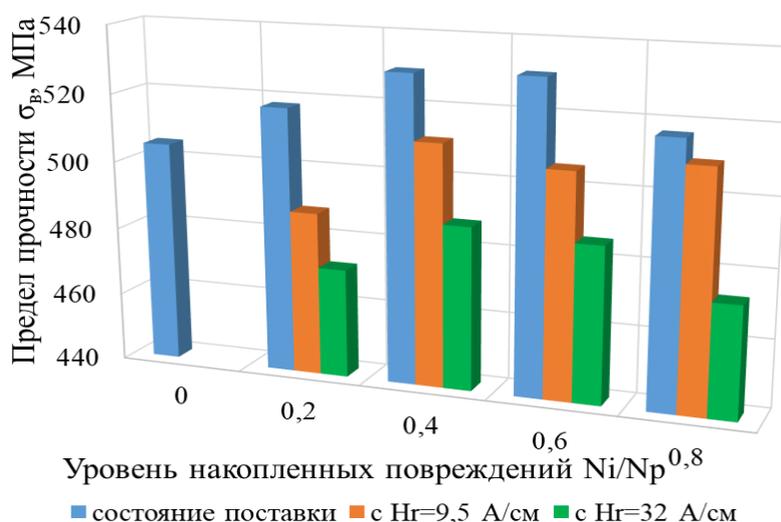


Рисунок 3 – Изменения предела прочности образцов от уровня накопленных усталостных повреждений в намагниченном состоянии и без магнитного воздействия

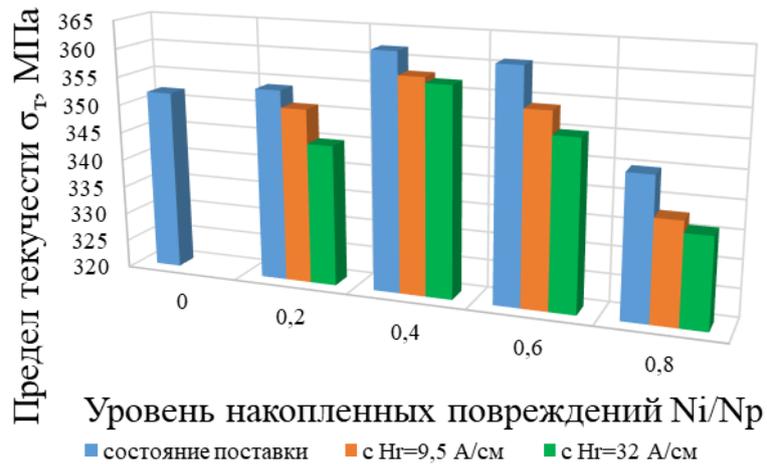


Рисунок 4 – Изменение предела текучести образцов от уровня накопленных усталостных повреждений в намагниченном состоянии и без магнитного воздействия

Результаты механических испытаний показали, что под воздействием постоянного магнитного поля предел прочности с 1 магнитом ($H = 9,5 \text{ A/cm}$) понизился на 7–30 МПа, а с 4 магнитами ($H = 32,5 \text{ A/cm}$) диапазон снижения составил от 42 до 46 МПа. Предел текучести с 1 магнитом ($H = 9,5 \text{ A/cm}$) уменьшился на 3–7 МПа, а с 4 магнитами ($H = 32,5 \text{ A/cm}$) диапазон снижения составил от 4 до 11 МПа.

На основании полученных механических характеристик в зависимости от уровня накопленных усталостных повреждений намагниченных образцов произведен теоретический расчет количества циклов до разрушения по формуле Лэнджера. Данный расчет необходим для сравнения теоретических и экспериментальных данных.

Исследования показали, что при проведении теоретических расчетов получено количество циклов до разрушения, равное 6875, а согласно экспериментальным данным среднее значение составило 6655 циклов. Отклонение между расчетными и экспериментальными данными составляет 3 %. По расчетам для намагниченных образцов количество циклов равно 5300, а по

результатам экспериментальных данных среднее значение составило 5057 циклов, отклонение между ними составляет 4 %.

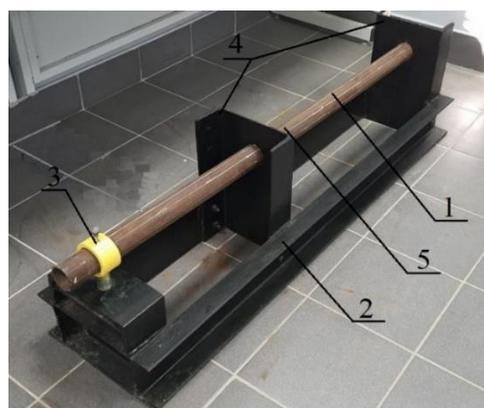
Известно, что напряженно-деформированное состояние в цилиндрических объектах распределено неравномерно, поэтому в целях имитации работы магистрального газопровода необходимо оценить изменение механических характеристик в трубном образце с концентратором напряжений.

В третьей главе изучено влияние магнитного поля на изменение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещиноподобного дефекта трубы, подверженной изгибным деформациям.

Для проведения эксперимента использован трубный образец из стали 09Г2С длиной 1500 мм, наружным диаметром 57 мм и толщиной стенки 4 мм. Предел текучести материала равен $\sigma_{0.2} = 342$ МПа, а предел прочности составляет $\sigma_B = 470$ МПа. На данный трубный образец нанесен концентратор напряжений (Рисунок 5, а) в виде надреза шириной 1 мм, длиной 20 мм, глубиной 2 мм, радиусом закругления в кончике надреза 0,5 мм. При проведении эксперимента использован стенд для создания, контролируемого нагружения трубных образцов путем изгиба, который представлен на Рисунке 5, б).



а)



б)

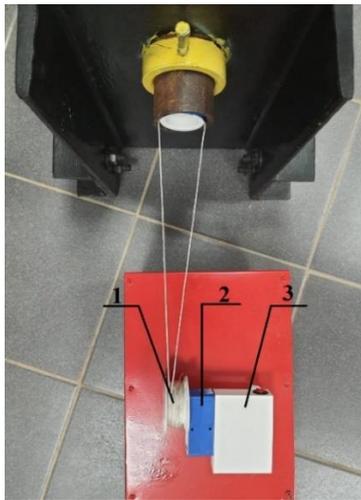
1 – исследуемый участок трубного образца; 2 – станина;

3 – узел нагружения; 4 – опоры; 5 – концентратор напряжений

Рисунок 5 – Фото участка трубного образца с концентратором напряжений (а), стенд с установленным трубным образцом (б)

В целях осуществления магнитного воздействия на трубный образец были подобраны и установлены неодимовые магниты с такой же величиной напряженности магнитного поля, с какой осуществляется воздействие на газопроводы при проведении ВМД, то есть до технического насыщения.

Магнитное насыщение ферромагнетика согласно ГОСТ 19693-74 составляет 400 А/м. В целях воздействия магнитным полем на трубный образец были изготовлены стенд (Рисунок 6, а) и модельный магнитный снаряд (Рисунок 6, б).



а)



б)

Рисунок 6 – Стенд для создания в трубном образце изгибающих напряжений с устройством передвижения (а) и блок намагничивания (б)

Известно, что средняя скорость ВМД согласно паспорту составляет 2 м/с. Для передвижения блока намагничивания разработано и изготовлено устройство передвижения магнитного снаряда (Рисунок 6, а), которое состоит из катушки 1, двигателя и редуктора 2 и блока питания 3. Устройство устанавливается в конце трубы, и с помощью привода осуществляется движение с заданной скоростью.

После того, как испытуемый образец был установлен в стенд, измерены величины напряженности магнитного поля прибором ИКН-9М-12 по 8 образующим, с шагом 4 мм, то есть измерена напряженность магнитного поля на трубном образце без воздействия магнитного поля и изгибающих напряжений. Затем трубный образец был подвержен изгибу, и проведены

измерения напряженности магнитного поля с тем же шагом и по тем же образующим. Изгибающие напряжения заданы 105 МПа, так как наличие надреза приводит к дополнительному увеличению максимальных напряжений в вершине надреза. Деформации контролировались индикатором часового типа.

Намагничивание трубного образца проводилось три раза через каждые 20 сут модельным магнитным снарядом, после чего измерялась напряженность магнитного поля трубы. Результаты проведенных исследований приведены на Рисунках 7, 8. На Рисунке 7 в зоне надреза зарегистрирован экстремум из-за повышенных напряжений в вершине трещины. Кроме того, зарегистрирован экстремум в зоне захвата трубного образца, который представляет собой жесткую заделку.



Рисунок 7 – Зависимость результирующей напряженности магнитного поля от длины рабочей зоны трубного образца при изгибающих деформациях без намагничивания

На Рисунке 8 представлена гистограмма напряженности магнитного поля в зоне надреза на различных этапах измерений. Поскольку в трубном образце имеется концентратор напряжений, то в целях определения максимальных напряжений необходимо рассчитать значения K_I по методике определения остаточного ресурса ОСТ 153-39.4-010-2002, согласно которому коэффициент интенсивности напряжений (КИН) равен $23,55 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$.

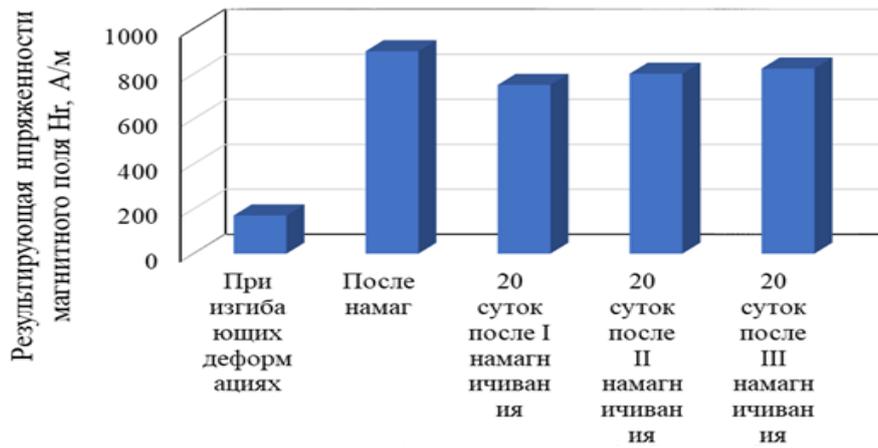
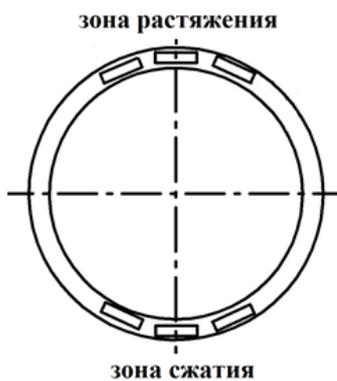
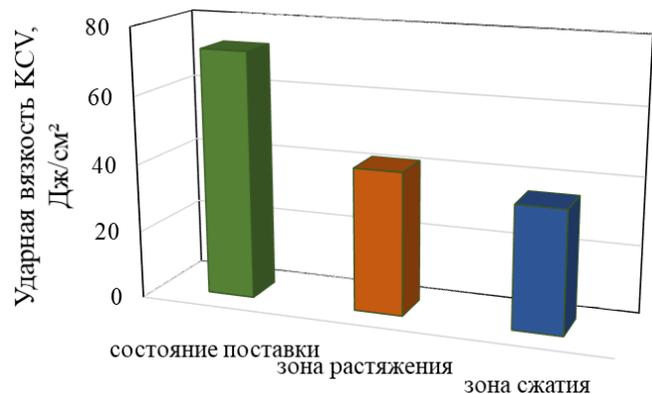


Рисунок 8 – Изменение результирующей напряженности магнитного поля в зоне надреза при различных этапах исследования

В целях определения механических характеристик определена ударная вязкость материала трубного образца в состоянии поставки, а также после длительной выдержки при статическом изгибе и намагничивании постоянным магнитным полем в зоне растяжения и сжатия (Рисунок 9, б). Зоны, из которых были вырезаны образцы, представлены на Рисунке 9, а.



а)



б)

Рисунок 9 – Карта раскроя трубного образца для определения ударной вязкости (а) и результаты изменения ударной вязкости (б)

Снижение ударной вязкости как в зоне растяжения, так и в зоне сжатия связано с охрупчиванием материала при намагничивании. Предел прочности и предел текучести (Рисунок 10) изменяются в различных зонах трубного образца неравномерно в связи с изменением структуры материала, что описывается в работе Ю. С. Ковшовой. Отсюда следует, что механические характеристики в трубном образце изменяются в большей степени по сравнению с результатами испытаний образцов из листового проката.

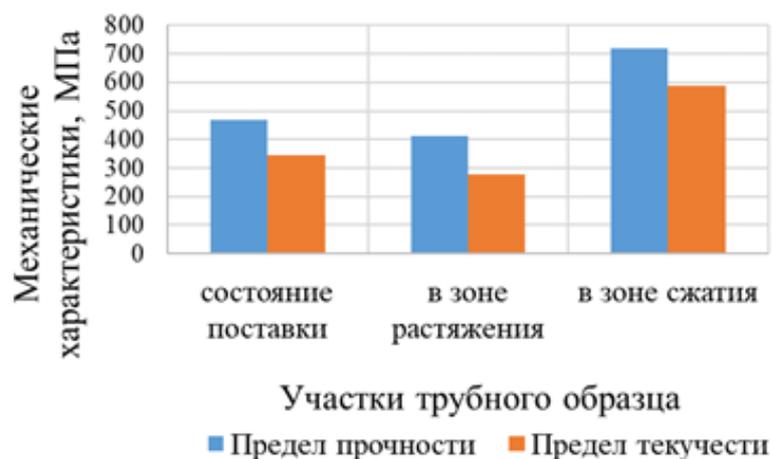


Рисунок 10 – Изменение механических характеристик трубного образца

В связи с тем, что установлен факт увеличения КИН от действия магнитного поля, в данной работе проведен расчет КИН по методике Y. Shindo, где описаны решения задач магнитоупругости в цилиндрических телах с трещинами при использовании сингулярных интервальных уравнений. Данные уравнения позволяют определить коэффициенты интенсивности напряжений в теле с трещиной произвольной конфигурации, подверженном действию внешнего магнитного поля и механических нагрузок.

По результатам расчетов (Таблица 2) получены значения КИН от действия механических статических деформаций, воздействия магнитного поля и их суммарные значения, по которым установлено, что в результате суммирования происходит увеличение КИН в три раза, повышая, тем самым, вероятность раскрытия трещины при эксплуатации.

Таблица 2 – Результаты расчетов коэффициентов интенсивности напряжений при различных этапах намагничивания

Этапы намагничивания	Магнитные характеристики					Коэффициенты интенсивности напряжений		
	Напряженность магнитного поля	Магнитная восприимчивость	Магнитная постоянная	Приложенная сила от магнитного воздействия	Коэффициент магнитоупругой связи	Коэффициент интенсивности напряжений от действия изгибающих напряжений	Коэффициент интенсивности напряжений от намагничивания постоянным магнитным полем	Суммарные значения КИН от механических и магнитных воздействий
	H_r , А/м	χ , Н/А ²	μ	P_{H0} , Н	b_{c^2}	K_I , МПа·м ^{0,5}	K_{Im} , МПа·м ^{0,5}	$K_I \times K_{Im}$, МПа·м ^{0,5}
После намагничивания	900	799	800	-63376	10.51	23,55	3,93	92,55
20 суток после I намагничивания	750	849	850	-63394	7,3	23,55	3,74	88,077
20 суток после II намагничивания	800	819	820	-63383	8,31	23,55	3,89	91,6
20 суток после III намагничивания	823	816	817	-63382	8,79	23,55	3,89	91,6

Четвертая глава посвящена оценке техногенного риска аварий на магистральном газопроводе с учетом изменения долговечности материала, вызванного проведением внутритрубной магнитной дефектоскопии. За основу расчетов выбран стандарт СТО Газпром 2-2.3-351-2009, который учитывает специфику работы магистрального газопровода.

При проведении идентификации опасностей в дерево событий добавлен дополнительный пункт «Намагничивание стенки трубопровода после проведения внутритрубной магнитной дефектоскопии» (Рисунок 11), который характеризует снижение долговечности металла в результате намагничивания стенки трубы. Разработано также дерево отказов и определены ожидаемые частоты аварий согласно анализу аварийных ситуаций по данным ФСЭТАН за 2016–2021 гг. (Таблица 3 и Рисунок 12).

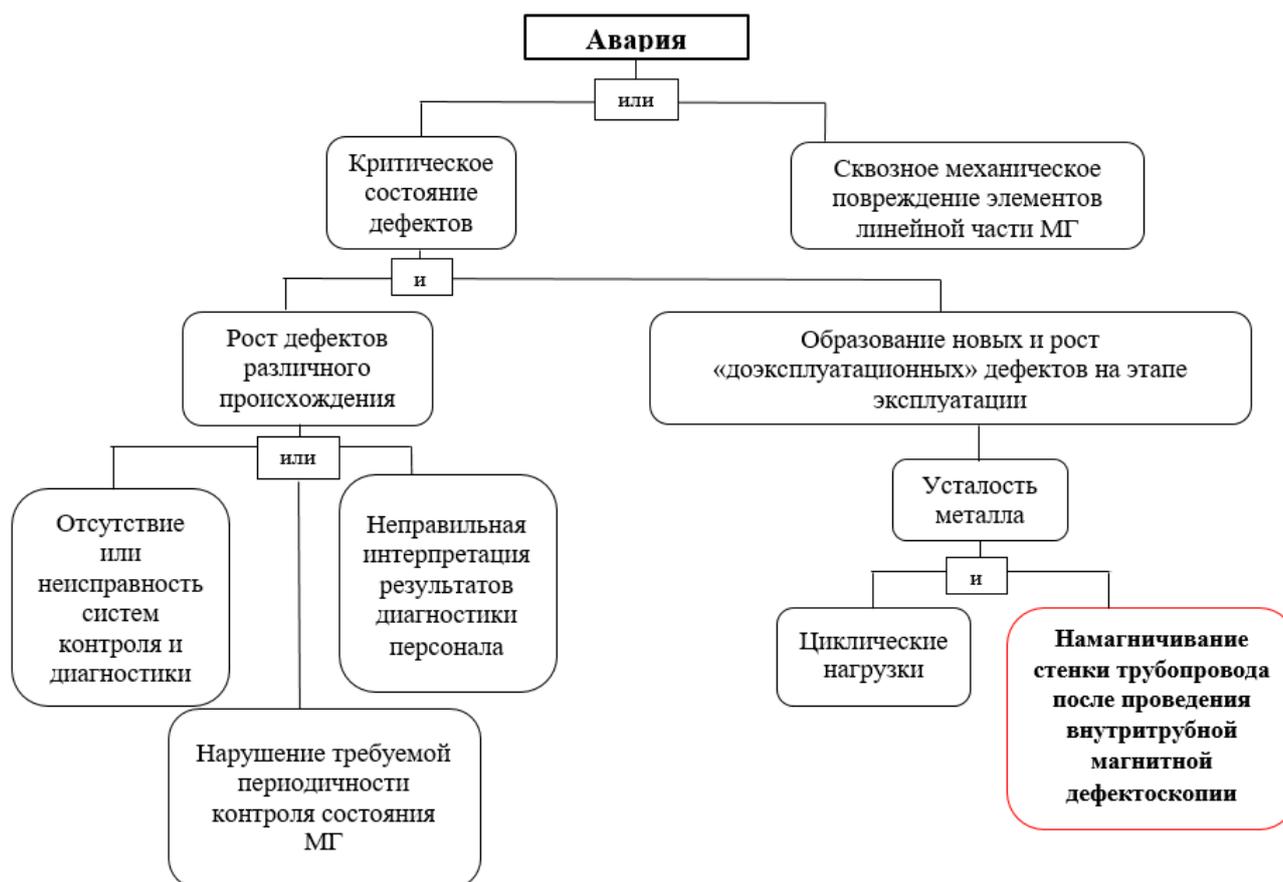


Рисунок 11 – Обобщенное дерево событий при разгерметизации МГ

Таблица 3 – Исходные данные для дерева отказов согласно статистическим данным ФЭСЭТАН за 2016–2021 гг. на территории РФ

Событие	Ожидаемая удельная частота, 1/(1000 км·год)
Износ основного металла S	0,0000567
Коррозионное повреждение E	0,00016
Брак СМР B	0,00010
Механическое повреждение газопровода D	0,00049
Воздействие стихии C	0,00007
Дефект сварного шва Z	0,00007
Ошибочное действие персонала E	0,00003

Согласно полученным экспериментальным данным, событие «Намагничивание стенки трубопровода после проведения внутритрубной магнитной дефектоскопии», которое добавлено в дерево событий (Рисунок 11), снижает усталостную долговечность материала газопровода, тем самым,

оказывает влияние на событие S «Износ основного металла», представленное в дереве отказов (Рисунок 12).

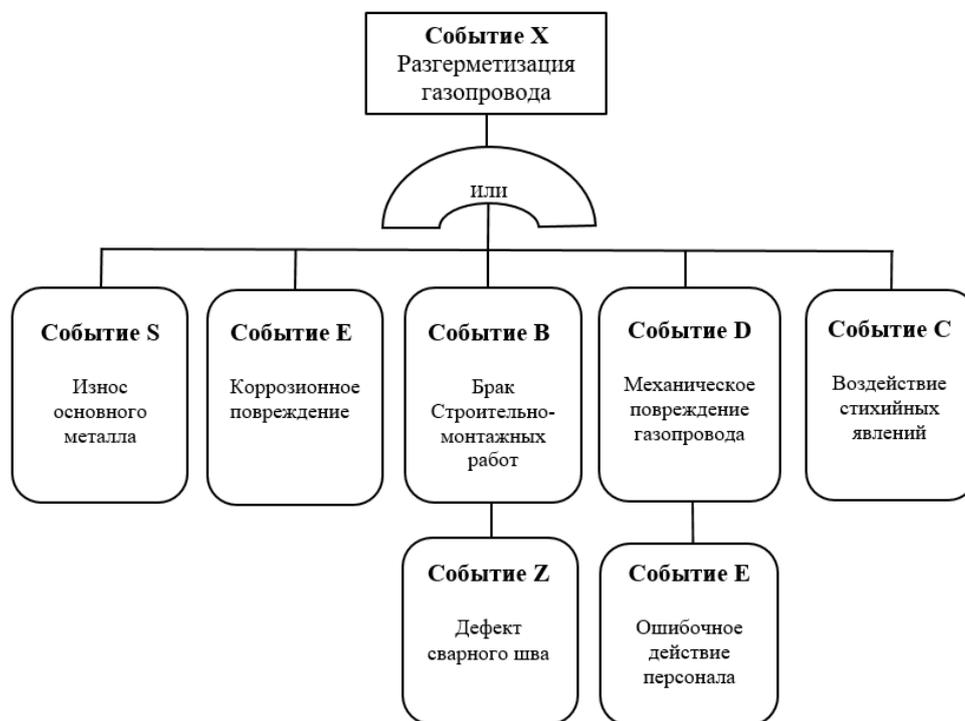


Рисунок 12 – Обобщенное дерево отказов разгерметизации магистрального газопровода согласно данным ФСЭТАН за 2016–2021 гг. на территории РФ

Из этого следует, что в результате воздействия магнитного поля вероятность данного события PS возрастает. Это необходимо учитывать при анализе техногенного риска линейной части магистрального газопровода (при наличии участков, где формируются упругопластические деформации).

По результатам расчетов техногенного риска для магистральных газопроводов линейной части на 1000 км/год получено, что условная вероятность разгерметизации составила $0,00097639 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$, вероятность после намагничивания трубопровода из-за проведения ВМД – $0,0009793 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$, что увеличило вероятность разгерметизации на 0,3%.

Для сравнительной оценки техногенного риска при намагничивании трубопровода и без воздействия магнитного поля выбран магистральный

газопровод Ургалинского линейного производственного управления протяженностью 89,9 км. Прокладка газопровода – подземная, с наружным диаметром 1420 мм. Сравнительная оценка техногенного риска для магистрального газопровода Ургалинского ЛПУ показала увеличение вероятности разгерметизации на 1,46 % при учете намагничивания стенки трубопровода до технического насыщения.

Исследование показало, что остаточная намагниченность в стенке газопровода снижает усталостную долговечность материала, тем самым, повышая вероятность разгерметизации газопровода. В целях повышения безопасности магистральных газопроводов путем уточнения величины вероятности разгерметизации предлагается использовать полученные результаты о снижении долговечности материала газопровода после диагностирования ВМД при расчете техногенного риска аварии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 По результатам проведенных исследований внесены предложения по повышению точности расчета техногенного риска магистральных газопроводов, учитывающие намагничивание металла стенки при проведении внутритрубной магнитной дефектоскопии путем введения дополнительного фактора в дерево событий, который необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации, что позволит повысить промышленную безопасность данного объекта.

2 По результатам анализа факторов, вызывающих аварийное разрушение магистральных газопроводов, представлена статистика аварий согласно ФСЭТАН за 2016–2021 гг. Рассмотрены существующие методы анализа риска аварий, обоснован выбор метода оценки техногенного риска линейной части магистральных газопроводов. Установлено неоднозначное мнение исследователей о влиянии магнитного поля на изменение механических характеристик и долговечности.

3 Установлено, что механические характеристики материала газопровода из стали 09Г2С при накоплении усталостных повреждений снижаются, при этом

максимальное снижение предела прочности с 1 магнитом ($H = 9,5 \text{ А/см}$) составило 30 МПа, а с 4 магнитами ($H = 32,5 \text{ А/см}$) – 46 МПа. Максимальное снижение предела текучести с 1 магнитом составило 7 МПа, а с 4 магнитами – 11 МПа. Кроме того, усталостная долговечность, полученная в результате малоцикловых испытаний образцов $\varepsilon = 0,27 \%$ и намагничивания постоянным магнитным полем до технического насыщения, показала снижение на 24 %.

4 Установлено трехкратное увеличение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещиноподобного дефекта (глубиной 2 мм, шириной 1 мм, длиной 20 мм) в результате длительного статического нагружения изгибными деформациями ($\varepsilon = 0,05 \%$) трубного образца (диаметром 57 мм, толщиной стенки 4 мм) из стали 09Г2С и воздействия постоянного магнитного поля до технического насыщения.

5 Проведен сравнительный анализ результатов расчетов техногенного риска линейной части магистрального газопровода по стандартной методике и с учетом намагничивания стенки трубы после проведения внутритрубной магнитной дефектоскопии, который показал увеличение вероятности разгерметизации газопровода на 1,46 %.

Основные положения диссертации опубликованы в 8 научных изданиях, наиболее значимые из которых:

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

1 Ильясова, А.И. Оценка техногенного риска по результатам внутритрубной магнитной дефектоскопии / А.И. Ильясова // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019. – № 1. – С. 125–143. – URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2019/ogbus_1_2019_p125-143.pdf.

2 Ильясова, А.И. Анализ влияния магнитного поля на металл / А.И. Ильясова // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2019. – № 2. – С. 136–142. – URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/2_2019/ogbus_2_2019_p156-168.pdf.

3 Ильясова, А.И. Изменение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещиноподобного дефекта трубы, подверженной изгибным деформациям, после проведения внутритрубной магнитной дефектоскопии / А.И. Ильясова, Е.А. Наумкин, И.Р. Кузеев // Проблемы сбора, подготовки и

транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2022. – Вып. 1 (135). – С. 114–126. – <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-1-114-126>.

- в прочих изданиях:

4 Гайфуллин, А.Ф. Строение усталостных изломов на примере стали 09Г2С / А.Ф. Гайфуллин, А.И. Ильясова // Международный научно-технический журнал «Аэтерна». – 2018. – № 5 (29). – С. 12–14.

5 Гайфуллин, А.Ф. Определение технического состояния скрытых участков стальных трубопроводов / А.Ф. Гайфуллин, А.И. Ильясова // Вестник молодого учёного УГНТУ. – 2018. – № 3. – С. 88–89.

6 Гайфуллин, А.Ф. Оценка техногенного риска трубопровода магистральных газопроводов от коррозии / А.Ф. Гайфуллин, А.И. Ильясова // Вестник молодого учёного УГНТУ. – 2018. – № 3. – С. 49–51.

7 Ильясова, А.И. Влияние магнитного поля на ферромагнитные материалы / А.И. Ильясова // Advances in Science and Technology: XL Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 31 октября 2021 г.). – М.: Научно-издательский центр «Актуальность. РФ», 2021. – С. 24–25.

8 Ильясова А.И. Обзорная статья о влиянии магнитного поля на металл / А. И. Ильясова // Современные технологии: проблемы инновационного развития и внедрения результатов: X Междунар. науч.-практ. конф. (5 августа 2021 г.). – Петрозаводск: МЦНП «Новая наука», 2021. – С.37-42.

9 Калякина Д.А. Техногенный риск / Д.А. Калякина, А.И. Ильясова // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: XII Междунар. науч. конф.: в 2 ч. (30-31 декабря 2021 г.). – Казань: ООО «Конверт», 2021. – Ч. 1. – С.77-80.

10 Ильясова А.И. Анализ аварий на магистральных газопроводах / Калякина Д.А., Ильясова А.И. // Новейшие исследования в современной науке: опыт, традиции, инновации: матер. XIII Междунар. науч. конф. (25-26 января 2022 г., г. Моррисвилль, Северная Каролина, США). – Моррисвилль: Лулу Пресс, 2022. – С.10-13.

11 Ильясова А.И. Влияние магнитного поля на ферромагнитные материалы / Калякина Д.А., Ильясова А.И. // Студенческий научный форум 2022: III Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2022. – С.25-27.