

БУРНАШЕВ Афанасий Васильевич

**Оценка предельного состояния материала магистральных газопроводов
Севера после длительной эксплуатации**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в Институте физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФТПС СО РАН)

Научный
руководитель:
Официальные
оппоненты:

Большаков Александр Михайлович, член-корр. РАН, профессор РАН.

Морозов Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры физики прочности Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт» (НИЯУ МИФИ).

Москвитин Геннадий Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией надежности и долговечности при термомеханических циклических воздействиях Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации Ордена трудового Красного Знамени Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ»)

Защита диссертации состоится «26» мая 2021 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.03.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан « » 20 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.03,
кандидат технических наук, доцент

М.В. Мурашов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Магистральные газопроводы Якутии – уникальные металлоконструкции, которые проложены и эксплуатируются в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

Вот уже на протяжении 50 лет стабильная эксплуатация газопроводных систем снабжает центральную часть Республики Саха (Якутия), в том числе город Якутск, природным газом. Протяженность магистральных газопроводов со сроком эксплуатации более 50 лет в данное время составляет более 200 километров и этот показатель с каждым годом увеличивается. Столь продолжительный срок эксплуатации в экстремальных климатических условиях не может не сказаться на общем техническом состоянии газопровода. Анализ аварийных ситуаций, произошедших на магистральных газопроводах Якутии, позволяет сделать вывод, что их эксплуатационный ресурс практически исчерпан и возникает опасность отказов, обусловленных протеканием деградиционных процессов материала труб.

В последние десятилетия изучению механических свойств и структуры металла длительно эксплуатируемых труб магистральных газо- и нефтепроводов посвящено немало работ, в которых были сделаны выводы о том, что при длительной эксплуатации под действием циклических и статических нагрузок протекают процессы, характерные для деформационного старения низколегированных и малоуглеродистых сталей, приводящие к их упрочнению и охрупчиванию.

В связи с этим особенную актуальность приобретает проблема оценки предельного состояния металла труб для принятия решения о продлении срока эксплуатации, проведении частичного или капитального ремонта или же о прекращении эксплуатации.

Большой вклад в развитие исследований по затрагиваемым вопросам обеспечения надежности внесли Серенсен С.В., Болотин В.В., Махутов Н.А., Ларионов В.П., Алешин Н.П., Панасюк В.В., Морозов Е.М., Матвиенко Ю.Г., Москвичев В.В., Гумеров А.Г., Хажинский Г.М., Харионовский В.В., Лыглаев А.В., Большаков А.М. и др. Большинство существующих методов оценки остаточного ресурса основаны на учете влияния локальных технологических, конструктивных и эксплуатационных дефектов, при этом остается неизвестным состояние материала на бездефектных участках, в нашем случае, основного металла труб в силу структурных изменений при длительной эксплуатации. Поэтому определение предельного состояния материала магистральных газопроводов должно основываться на установлении реального физического состояния материала труб в зависимости от времени эксплуатации.

Цель работы: Разработка методики оценки эксплуатационной надежности магистральных газопроводов Севера путем оперативной диагностики предельного состояния материала труб.

Для достижения цели исследования в диссертационной работе были поставлены и решены следующие **основные задачи:**

1. Установить зависимость между механическими и акустическими параметрами металла магистральных газопроводов и ее изменение в процессе

длительной эксплуатации.

2. Оценить предельное состояние металла магистральных газопроводов после длительной эксплуатации с применением методов оперативной диагностики путем установления критических значений скорости звука, соответствующих предельному значению их ударной вязкости.

3. Разработать метод оценки остаточного ресурса магистральных газопроводов Севера на основе оценки акустических параметров трубного металла.

Научная новизна:

- определены механические характеристики, ударная вязкость, характеристики трещиностойкости и акустические параметры (скорость звука) металла труб магистральных газопроводов после 50-летней эксплуатации в условиях низких климатических температур;

- установлена корреляционная зависимость между механическими и акустическими параметрами металла магистральных газопроводов, позволяющая оценить предельное состояние металла магистральных газопроводов после длительной эксплуатации;

- предложен метод оценки остаточного срока службы магистрального газопровода по изменению скорости звука в материале трубы.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением апробированных методов испытаний, современных средств измерений и испытательных приборов, характеризующихся высоким уровнем точности и практическим использованием результатов диссертационной работы при оценке предельного состояния магистрального газопровода.

Практическая ценность работы заключается в разработке метода оценки предельного состояния длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов, позволяющего без остановки работы контролируемого объекта и нарушения целостности конструкции провести оценку степени охрупчивания методами неразрушающего контроля.

Получен патент на изобретение «Способ определения предельного состояния материала магистральных газопроводов» (пат. №2691751).

Внедрение результатов научного исследования.

Результаты исследования были успешно использованы при проведении обследования технического состояния магистральных газопроводов, эксплуатирующихся в сложных климатических условиях Севера.

Внедрение предложенного способа оценки реализовано в организации, транспортирующей природный газ - АО «Сахатранснефтегаз».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработка способа оценки предельного состояния сталей магистральных газопроводов, основанного на корреляционной зависимости между механическими и акустическими параметрами металла труб.

2. Экспериментально-расчетное определение значения критической скорости акустических волн в металлах труб магистральных газопроводов, соответствующее предельному значению их механических параметров.

3. Обоснование эксплуатационной надежности длительно эксплуатирующихся магистральных газопроводов путем оперативного

контроля характеристик, чувствительных к процессам старения материала.

Личный вклад автора заключается в разработке и реализации метода оценки предельного состояния материала магистральных газопроводов; исследовании закономерностей деградации конструкционных материалов в зависимости от времени эксплуатации; анализе, обобщении и внедрении экспериментальных результатов; формулировке основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость работы.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам лабораторий ИФТПС СО РАН и АО «Сахатранснефтегаз», оказавших огромную помощь при проведении испытаний и сборе материалов.

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались в сборнике трудов Всероссийской конференции «Сварка и безопасность» (г. Якутск, 2012 г.); IV и V Всероссийских научных конференциях «Безопасность и живучесть технических систем» (г. Красноярск, 2012, 2015 гг.); VII и VIII Евразийских симпозиумах по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата (г. Якутск, 2014, 2018 гг.); Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 70-летию профессора-механика А.В. Лыглаева, (г. Якутск, 2016 г.); IV и XII международных конференциях «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2009, 2018 гг.); VIII Международной конференции «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2018 г.); VI Всероссийской конференции «Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем» (г. Красноярск, 2018 г.); IV международной конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение» (г. Москва, 2018 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 8 публикациях (3,075 п.л./2,16 п.л.) в журналах и сборниках трудов, из которых 5 (2,75 п.л./1,9 п.л.) статей опубликованы в журналах из списка, рекомендованных ВАК РФ, 3 опубликованы в переводных научных изданиях, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Основное содержание работы изложено на 107 страницах машинописного текста и содержит 46 рисунков, 14 таблиц. Список литературы включает 100 источников.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержится обзор и анализ работ, посвященных магистральным газопроводам (далее МГ), эксплуатирующимся в условиях Севера, рассмотрены особенности строительства и эксплуатации газопроводов в условиях Севера, приведен обзор проблем, влияющих на надежность и безопасность МГ, связанных с суровыми условиями эксплуатации. Проведен анализ аварий, произошедших после длительного срока эксплуатации, рассмотрены методы оценки предельного состояния основного материала труб

после длительной эксплуатации, учтены недостатки и преимущества существующих методов оценки предельного состояния.

Обзор исследований причин аварий на МГ Якутии показывает, что деградация физико-механических характеристик материала труб является одной из основных причин, влияющих на развитие процессов разрушения и роста трещины до критического уровня. Если металл находится в охрупченном состоянии, то увеличивается вероятность его разрушения от малейшего дефекта. Изучению достижения данного состояния материалом и посвящена настоящая работа, и нацелена не только на исследование труб после длительной эксплуатации, но и на создание базы данных для периодического контроля изменения свойств вновь строящихся МГ при эксплуатации.

Выполненный анализ по теме исследования показал, что, несмотря на значительные успехи ученых в этом направлении, оценка предельного состояния материалов МГ после длительной эксплуатации остается серьезной проблемой для исследователей и эксплуатирующих организаций. Решение задачи в значительной степени осложняется суровыми условиями эксплуатации газопроводов Республики Саха (Якутия), оказывающих существенное влияние на физико-механические характеристики материала труб.

Большинство существующих методов оценки предельного состояния и остаточного ресурса основаны на учете влияния локальных технологических, конструктивных и эксплуатационных дефектов, тогда как остается неизвестным состояние материала на бездефектных участках, в нашем случае, основного металла труб в силу структурных изменений при длительной эксплуатации.

Несовершенства методов подталкивают к разработке новых способов определения предельного состояния материала длительно эксплуатирующихся магистральных газопроводов, которые должны учитывать реальное физическое состояние материала труб в зависимости от времени эксплуатации.

Вышеприведенный анализ современного состояния проблемы явился обоснованием для постановки цели и задач диссертационной работы.

Вторая глава посвящена исследованию механических свойств сталей МГ после длительной эксплуатации в условиях Севера. Проведен обзор сталей, применяемых для строительства магистральных газопроводов и газопроводов северного исполнения.

Для научных исследований были предоставлены катушки из труб одной партии, хранившиеся в условиях консервации 50 лет (аварийный запас), и бывшие в эксплуатации такое же время. Трубы изготовлены из низколегированной стали 09Г2С, по техническим условиям ВТУ ЧМТУ-УКРНТИ 537-64 в 1964 году Ждановским металлургическим заводом им. Ильича.

Проведены испытания на одноосное растяжение плоских образцов, определены механические свойства материала труб после 50-летней эксплуатации в условиях многолетнемерзлых грунтов и низких температур, проведена сравнительная оценка с данными, полученными на трубах из аварийного запаса.

Результаты исследований структуры материала труб из аварийного запаса и после 50-летней эксплуатации показывают, что стали имеют одинаковые

перлитно-ферритные структуры и соответствуют нормализованному прокату. Заметных изменений структуры труб аварийного запаса и после эксплуатации не наблюдается (Рисунок 1, а,б).

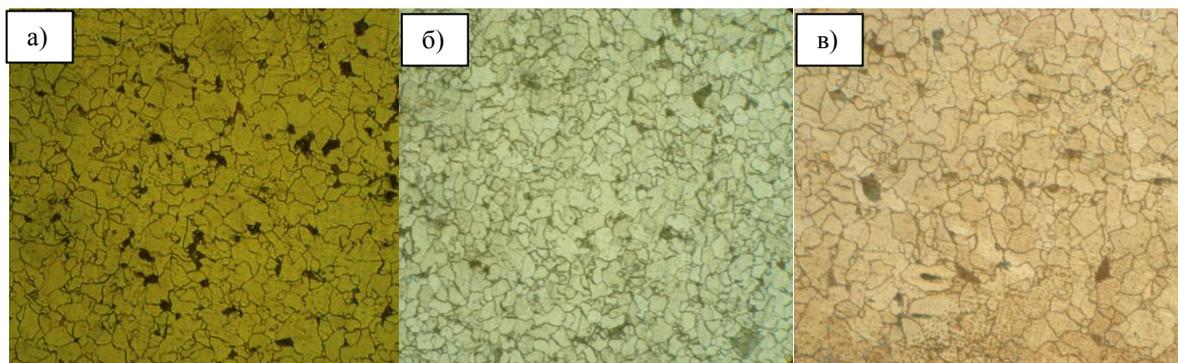


Рисунок 1. Структуры исследованных сталей: а) аварийного запаса; б) после длительной эксплуатации; в) после деформационного старения

Третья глава посвящена исследованию характеристик сопротивления материала магистральных газопроводов к хрупким разрушениям. Представлены результаты испытаний на ударный изгиб и трещиностойкость сталей магистральных газопроводов после различных состояний.

Для создания набора структурных состояний и определения значений их ударной вязкости проведены эксперименты по дополнительному термодиформационному старению стали трубы после 50-летней эксплуатации.

Режимы старения выбирались таким образом, чтобы значения ударной вязкости были близки предельному значению, указанному в нормативных документах. Согласно ТУ 14-3Р-1471-2002, ударная вязкость с V-образным концентратором при минимальной температуре минус 20 °С должна быть не менее $KCV_{кр}=39,2$ Дж/см². Для получения соответствующего структурного состояния были проведены испытания на одноосное растяжение лопаточных образцов на величины $\epsilon=4\%$, 8% , 10% , из которых изготавливались образцы на ударный изгиб согласно схеме (Рисунок 2). Предельное состояние ударной вязкости было достигнуто при величине пластической деформации $\epsilon=10\%$.

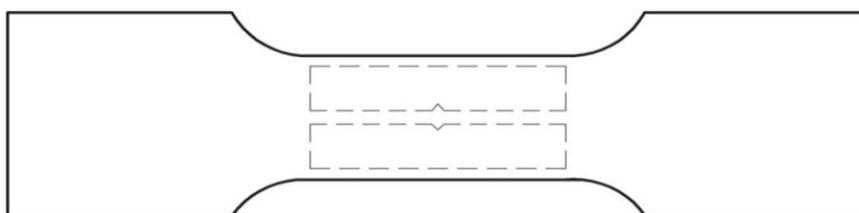


Рисунок 2. Схема образца для термодиформационного старения, пунктиром - схема изготовления образцов на ударный изгиб

На Рисунке 4 показаны значения ударной вязкости при положительной температуре в зависимости от срока эксплуатации и степени деформационного старения материала образца.

Результаты испытаний показывают, что ударная вязкость образцов с V-образным (острым) надрезом является более чувствительным параметром для оценки структурных изменений, чем ударная вязкость, определенная на образцах с U-образным (круглым) надрезом.

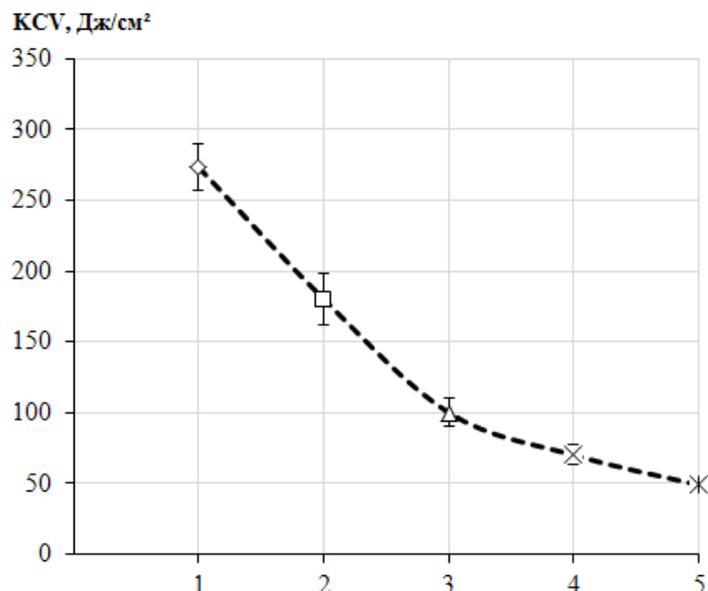


Рисунок 4. Значения ударной вязкости трубной стали 09Г2С при разных структурных состояниях (при температуре 20 °С):
 1– аварийный запас; 2–после 50-летней эксплуатации; 3–после термодеформационного старения $\epsilon=4\%$; 4–после термодеформационного старения $\epsilon=8\%$; 5–после термодеформационного старения $\epsilon=10\%$

Макроскопические изображения изломов образцов представлены на Рисунке 5. Видно, что после деформационного старения ($\epsilon=10\%$) поверхность разрушения на 100% состоит из кристаллического излома. Иначе говоря, металл достиг своего предельного состояния.

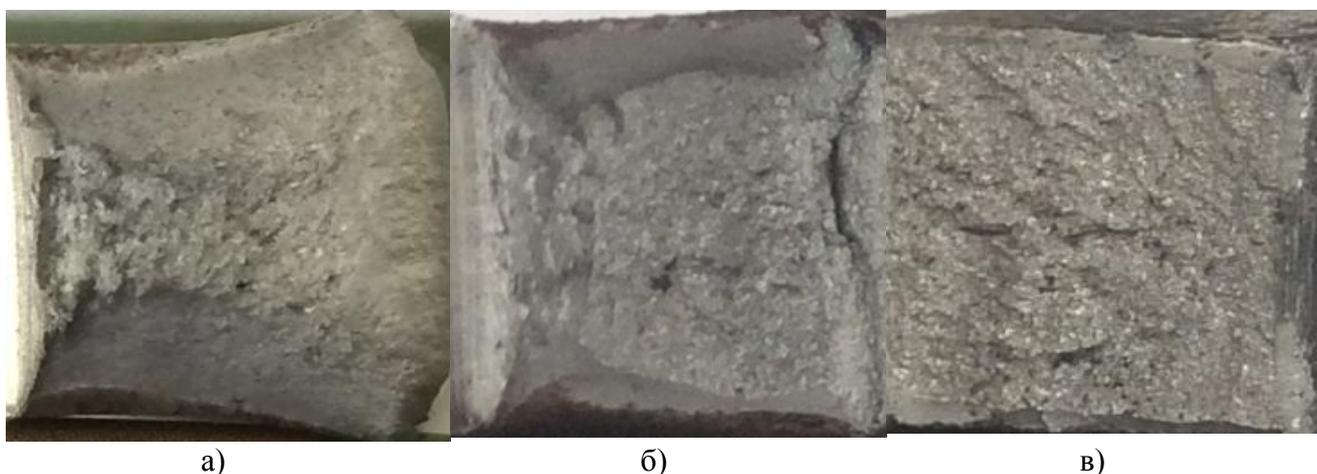


Рисунок 5. Изломы образцов из металла труб в различных состояниях, испытанных на ударный изгиб: а) аварийный запас (доля вязкого составляющего 70%); б) после эксплуатации (доля вязкого составляющего 35%); в) после термодеформационного старения $\epsilon=10\%$ (доля вязкого составляющего 0% – хрупкий излом)

В ходе работы проведены исследования трещиностойкости материала магистрального газопровода после 50 лет эксплуатации при испытаниях образцов на внецентренное растяжение по ГОСТ 25.506-85. На Рисунке 6 представлены температурные зависимости трещиностойкости для образцов из сталей МГ после различных сроков эксплуатации.

Проведена сравнительная оценка с результатами, полученными сотрудниками Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН при испытаниях металла труб исследуемого магистрального газопровода в исходном состоянии и после 20 лет эксплуатации.

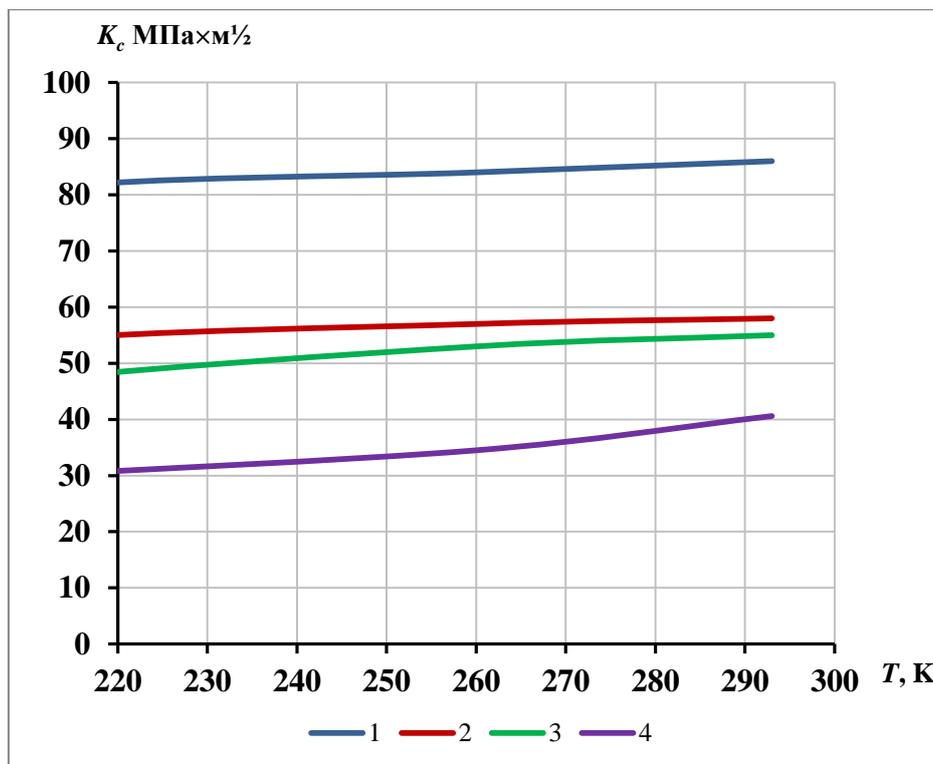


Рисунок 6. Трещиностойкость материала трубы МГ:

1 – исходное состояние; 2 – после эксплуатации 20 лет; 3 – после эксплуатации 50 лет; 4 – после термодиформационного старения $\epsilon=10\%$

Наблюдается снижение характеристик трещиностойкости трубного металла после 50 лет эксплуатации более чем на 30% по сравнению с исходным состоянием. После термодиформационного старения происходит еще более значительное снижение значений вязкости разрушения.

Исследования, результаты которых представлены в данной главе, показывают, что структурно-деградационные изменения, происходящие при длительной эксплуатации, значительно снижают способность материала сопротивляться хрупким разрушениям. Использование данных характеристик целесообразно для оценки степени деградации материала.

В четвертой главе отражены основные результаты исследования по оценке предельного состояния материала МГ для повышения их эксплуатационной надежности. Исследовано влияние длительной эксплуатации на акустические параметры металла. Получены корреляционные соотношения механических и акустических параметров материала труб. Предложены методы оценки предельного состояния и оценка остаточного срока службы материала труб, основанные на корреляционных соотношениях.

В последнее время в научных исследованиях структуры и свойств материалов стали широко применять акустические методы. Благодаря высокой проникаемости и острой направленности излучения, стабильности результатов

измерений, акустические методы занимают одно из передовых мест в неразрушающих методах контроля. Данный метод основан на регистрации параметров упругой волны при взаимодействии с контролируемым объектом, главным образом, на зависимости скорости распространения и затухания акустических волн от свойств материала и процессов, происходящих в объекте.

Ряд работ посвящен применению акустических методов при контроле структуры и свойств сталей. Так, например, методика измерения скорости звука была применена для неразрушающего контроля отпускной хрупкости низколегированных сталей от режимов закалки, отпуска. По изменению скорости звука определяли различие между охрупченным и вязким состоянием исследуемого материала. Большой вклад в изучение влияния структуры сталей на скорость распространения ультразвуковых волн был внесен Муравьевым В.В. и его соавторами, которые исследовали изменение скорости ультразвука в сталях, полученных при разных температурах термической обработки и, соответственно, с различными структурами.

В этой связи скорость звука целесообразно применять как один из информативных параметров для оценки изменений структуры в процессе длительной эксплуатации.

На Рисунках 7-8 представлены результаты измерений скорости звука на сегментах из труб МГ.

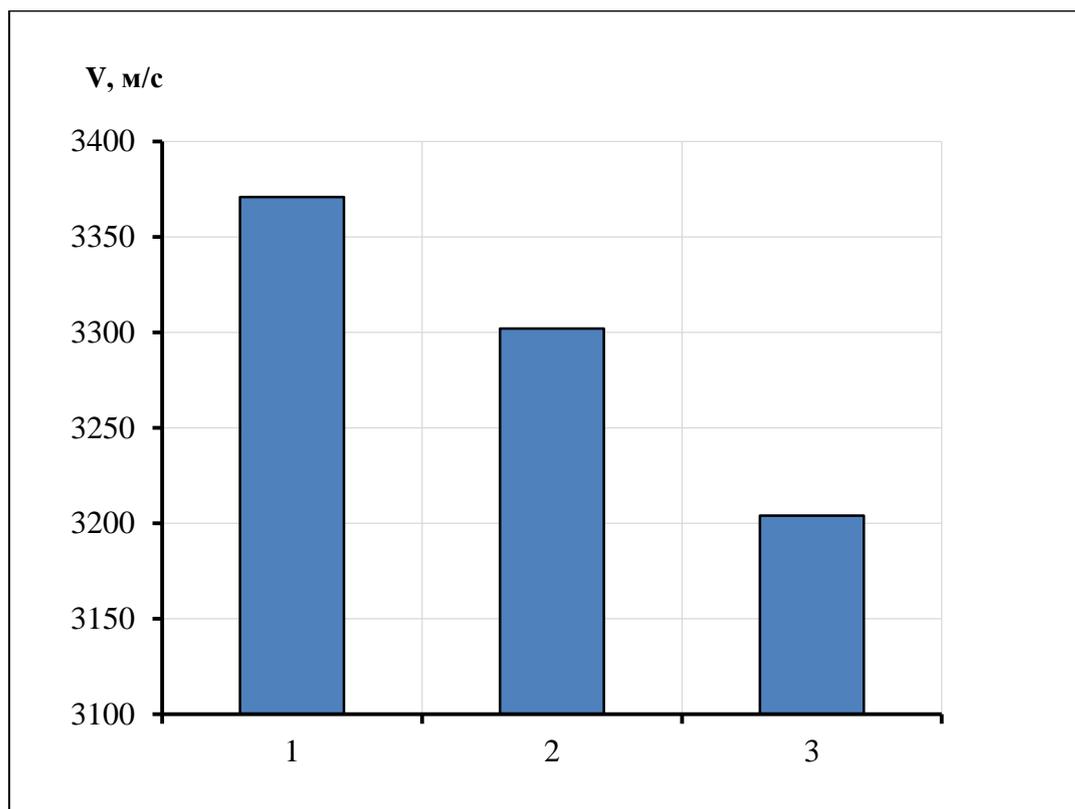


Рисунок 7. Зависимость скорости поперечных волн от структурного состояния.
1– аварийный запас; 2 – после 50-летней эксплуатации; 3–после термодформационного старения $\epsilon=10\%$

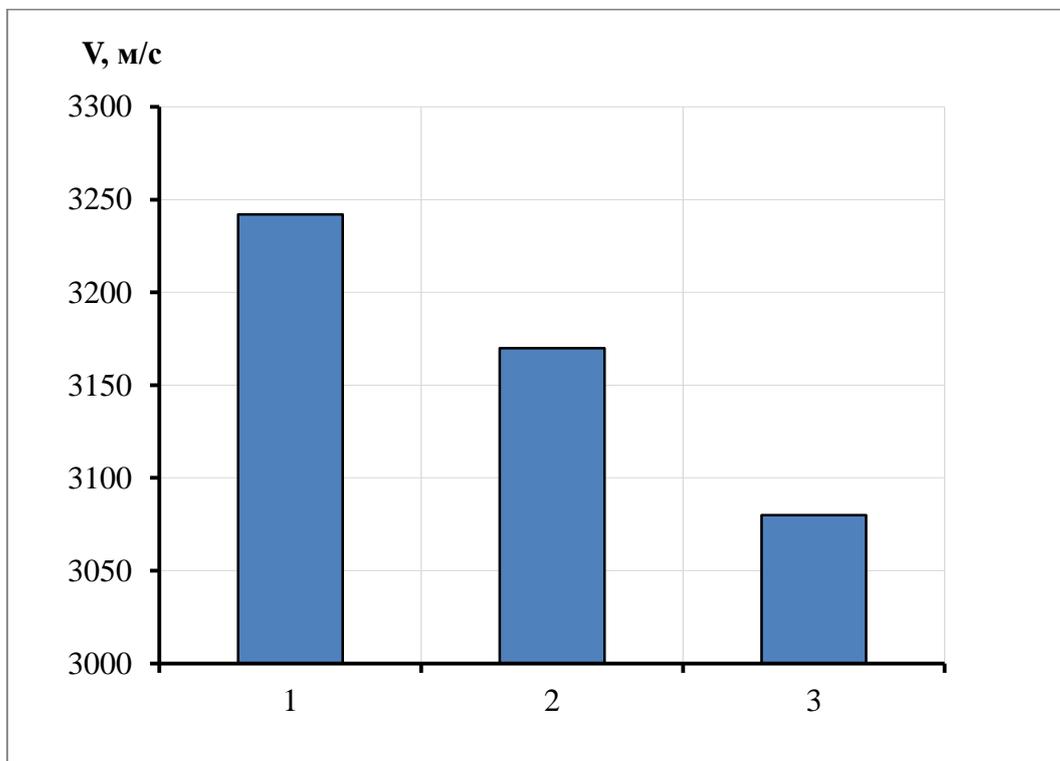


Рисунок 8. Зависимость скорости поверхностных волн от структурного состояния.

1– аварийный запас; 2– после 50-летней эксплуатации; 3– после термомодеформационного старения $\epsilon=10\%$

Как видно из гистограмм, в процессе 50-летней эксплуатации газопровода наблюдается снижение скорости звука, которое мы связываем со структурными изменениями трубного металла в результате деградиционных процессов. Образец после термомодеформационного старения ($\epsilon=10\%$) использовали для имитации предельного состояния и измерения значений скорости звука для данного структурного состояния. Для обоих типов волн и ориентаций направления измерений прослеживается одинаковая закономерность снижения скорости звука.

Снижение скорости звука связано со структурно-деградационными процессами, протекающими в материале трубы при длительной эксплуатации, которые, в свою очередь, происходят вследствие деформационного старения металла трубы и процессов, связанных с ним.

Изучая результаты испытаний на ударный изгиб и акустических измерений, естественно предположить, что изменения величин и характеры разрушения связаны с изменениями структуры материала в процессе длительной эксплуатации. Основываясь на собственных экспериментальных данных, а также сопоставлении полученных результатов с результатами работ в данной области, построены корреляционные зависимости $KCV(V)$ для поперечных и поверхностных волн (Рисунок 9).

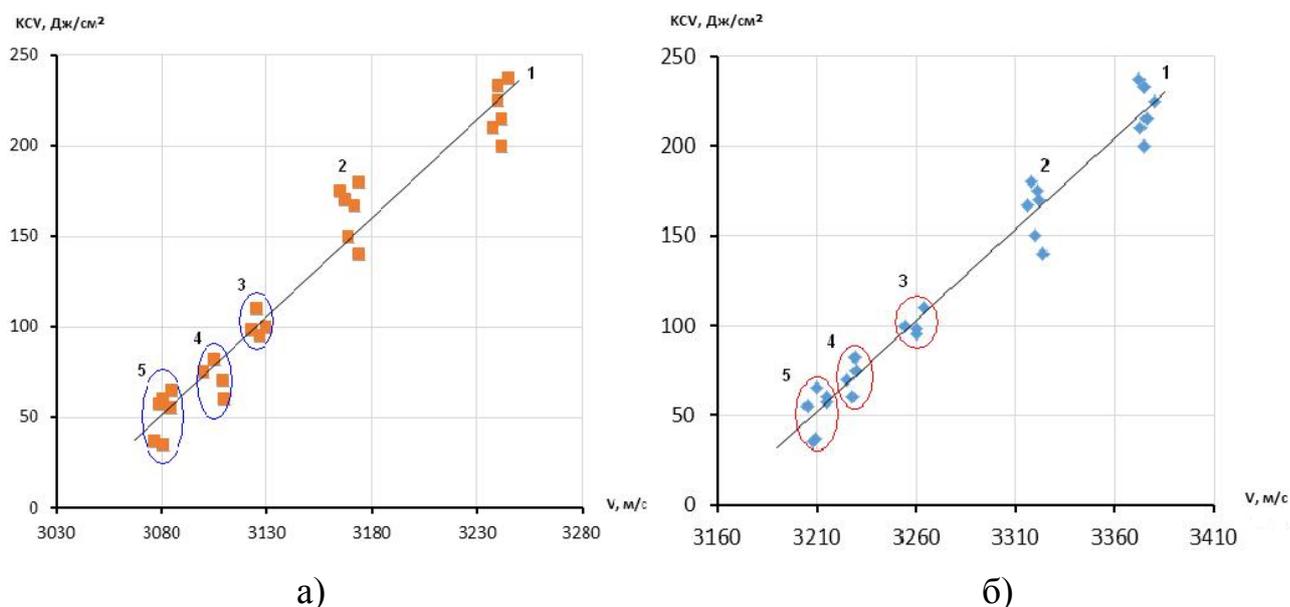


Рисунок 9. Корреляционные зависимости ударной вязкости и скорости звука:
 а – поверхностной волны; б – поперечной волны.

1–металл трубы аварийного запаса; 2–после эксплуатации 50 лет;
 3,4,5– режимы термодформационного старения ($\epsilon=4\%, 8\%, 10\%$)

Участкам с высокой ударной вязкостью и скоростью звука соответствует материал трубы аварийного запаса. Участкам с низкими значениями исследуемых величин соответствуют материалы труб после эксплуатации и после термодформационного старения. Разница значений данных величин связана с эксплуатационной деградацией структуры материала.

Как видно из рисунка, имеет место не только совпадение максимумов, но и достаточно хорошая корреляция кривых. Подобие кривых сводится к линейным зависимостям $KCV(V)$. Корреляционные уравнения, полученные методом наименьших квадратов, имеют вид:

для поверхностной волны

$$KCV = 1,022 * V - 3362,1, \quad (1)$$

для случая поперечной волны

$$KCV = 1,099 * V - 3336,5 \quad (2)$$

Коэффициенты корреляции $R^2=0,95$ – для случая поверхностной и $R^2=0,96$ – поперечной волны соответственно.

В работе предлагается использовать полученную корреляционную зависимость для оценки предельного состояния материала конструкции.

Заштрихованная область на Рисунке 10 соответствует предельным значениям исследуемых параметров. Таким образом, при попадании в данную зону значений исследуемых параметров приходим к выводу, что материал достиг своего предельного состояния.

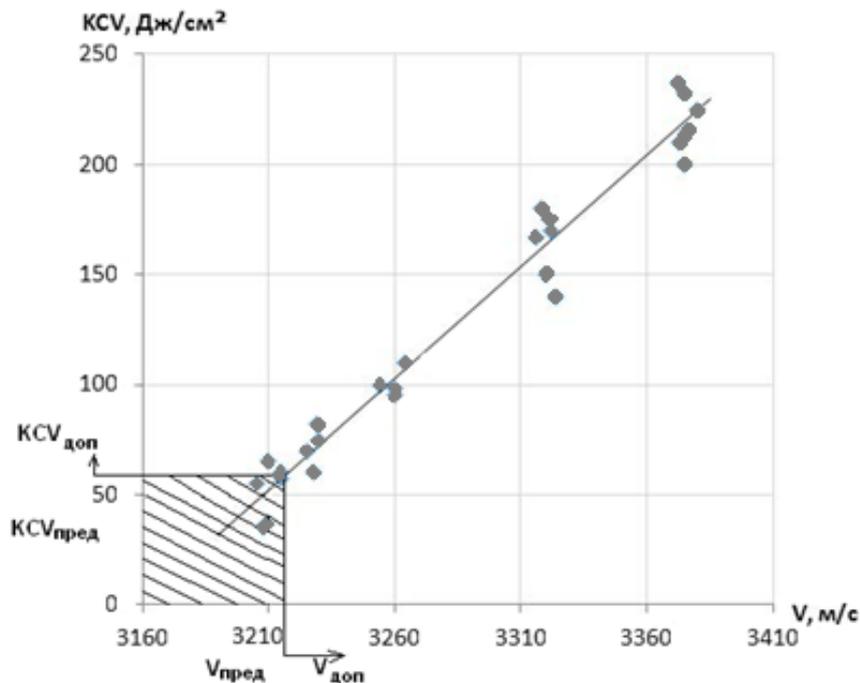


Рисунок 10. Область предельных значений ударной вязкости и скорости звука

На основании проведенных исследований разработана блок-схема метода оценки предельного состояния материала магистрального газопровода, которая представлена на Рисунке 11.

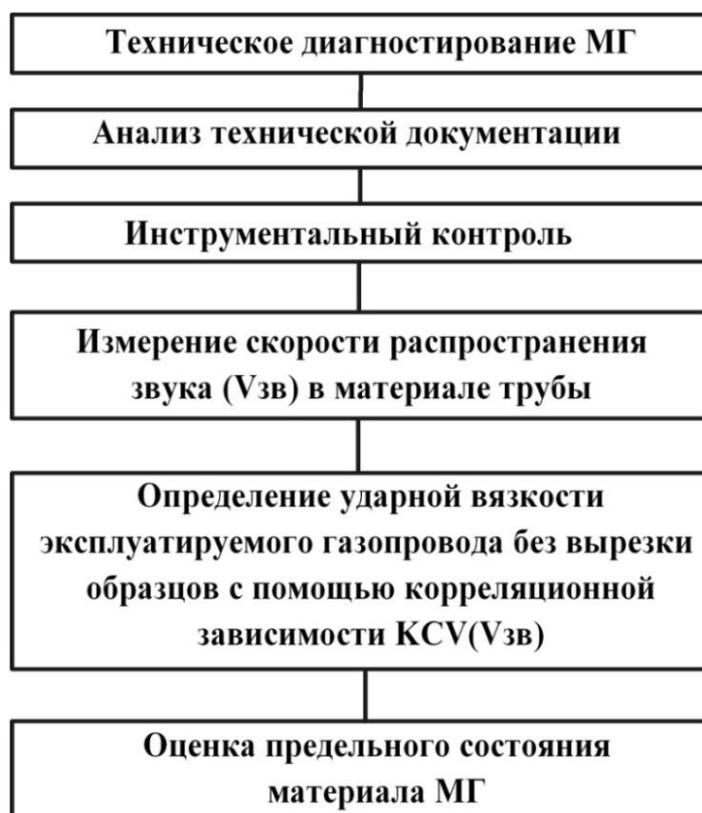


Рисунок 11. Блок-схема метода оценки предельного состояния материала магистрального газопровода

Данная методика была апробирована при проведении мониторинга технического состояния магистрального газопровода в рамках НИР, получены значения исследуемых параметров и создана база данных для их дальнейшего мониторинга.

Участком для НИР были выделены 2 нитки магистрального газопровода Мастах-Берге-Якутск протяженностью по 2,5 км. Измерения проводили в местах, где предполагалась высокая вероятность протекания процессов старения. Два замера проводились в шурфах, третий – на открытом участке. Скорость звука измеряли по четырем секторам, результаты заносили в протокол измерений. С использованием корреляционной зависимости $KCV(V)$ проводится оценка ударной вязкости материала трубы. При следующей диагностике производится повторное измерение значений скорости в этих же точках и, сравнивая с первоначальными значениями, получаем возможность судить об изменении состоянии материала трубы. В Таблице 2 приведен протокол измерения скорости звука с целью мониторинга технического состояния материала.

Таблица 2.

Данные замеров скорости звука в материалах магистрального газопровода на исследуемых участках

Номер участка, пикетаж	Год	Скорость звука, м/с
Шурф 1 II нитка, Пк269	2018	3202±5
	2022	-
	2026	-
Шурф 2, I нитка Пк269	2018	3172±5
	2022	-
	2026	-
Открытый участок II нитка, Пк271	2018	3200±5
	2022	-
	2026	-

Замеры скорости звука и оценка по этим значениям ударной вязкости показали, что ударная вязкость металла трубы на исследованных участках соответствует ударной вязкости металла трубы после 50-летней эксплуатации, проведенных в лабораторных условиях на маятниковом копре. Значения находятся в пределах допустимых норм. В каждой точке контроля проводилось более 10 измерений. Разброс значений скорости составляет 0,1-0,15%.

Вклад настоящей работы состоит в расширении области применения существующих методов, основанных на связи скорости звука и механических свойств, а именно применению при оценке предельного состояния магистральных газопроводов для повышения их эксплуатационной надежности.

Преимущество использования данного метода заключается в том, что без вырезки и изготовления образцов и проведения множества испытаний, используя корреляционную зависимость $KCV(V)$, возможно проведение оперативной оценки предельного состояния металла труб без остановки работы

контролируемого объекта.

Также в работе предложен метод оценки остаточного срока службы МГ по изменению скорости звука. Для прогнозирования ресурса применена математическая модель экспоненциального вида, предложенная в работах Болотина В.В., Вентцель Е.С., которая широко применяется в прикладных расчетах, в том числе за пределами его применимости.

Определение остаточного ресурса, представленное на Рисунке 12, производится путем построения графика функции $V(t)$ «скорость звука – время эксплуатации» по формуле 3. Строятся две кривые: первая V , вторая V_1 в виде нижней границы функции V с интервалом точности минус 0,5%. В этих же координатах строятся две прямые: $V_\phi=3169$ м/с и $V_{пред}=3081$ м/с - параллельно оси абсцисс и прямая $t_\phi=50$ лет параллельно оси ординат.

Точка пересечения V_ϕ и t_ϕ отмечается точкой Z . Данная точка должна попадать в интервал точности функции V или над кривой V . Разность $t_{кр}-t_\phi$ дает $t_{ост}$ - искомое значение остаточного срока службы. В случае, когда точка Z не попадает в интервал точности, т.е. ниже кривой V_1 , то следует уточнить параметры μ и λ или вместо t_ϕ использовать для расчета $t_{уф}$ – условно-фактическое время эксплуатации, равное абсциссе точки пересечения V_1 и V_ϕ . В этом случае $t_{ост}=t_{кр}-t_{уф}$.

$$V t = a + \mu V_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где a , μ – коэффициенты корреляции; λ – параметр отражающий процесс старения относительно первоначального значения скорости волны V_0 , который определяется на основе имеющихся экспериментальных данных путем их аппроксимации и постоянно уточняется при получении новых данных.

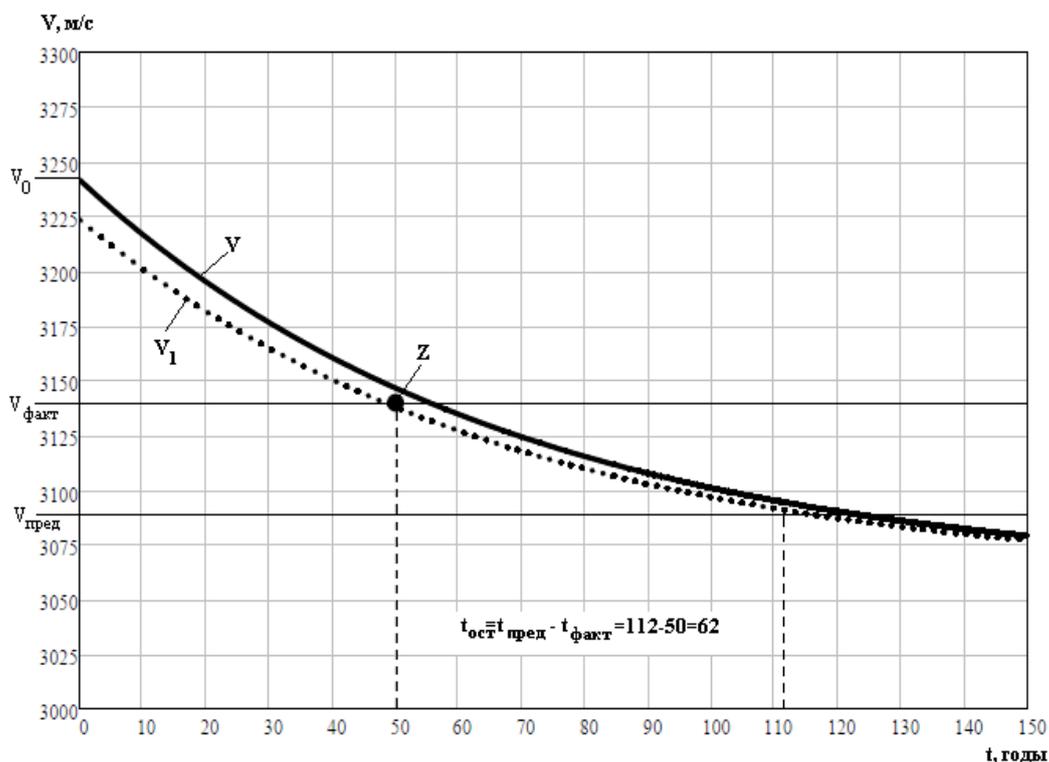


Рисунок 12. Расчет остаточного срока службы магистрального газопровода по изменению скорости звука

Полученное значение срока остаточного ресурса по изменению скорости звука в материале газопровода Мастах–Берге–Якутск соответствует результату, рассчитанному по методу, приведенному в РД12-411-01.

Таким образом, из вышеприведенного подтверждается возможность применения предложенного метода для оперативного (без вырезки образцов, при проведении технического диагностирования) расчета остаточного ресурса длительно эксплуатируемого магистрального газопровода по изменению скорости распространения звука в материале трубы.

Метод оценки предельного состояния материала МГ был апробирован при проведении технического диагностирования состояния МГ в рамках научно-исследовательских работ, получены значения исследуемых параметров и создана база данных для их дальнейшего мониторинга.

Данный метод может быть применен для исследования любых стальных конструкций, но для широкого применения в арсенале исследователя должны быть исходные значения скорости звука и корреляционные зависимости исследуемых параметров в зависимости от марки стали диагностируемого объекта.

Кроме оценки предельного состояния и остаточного ресурса старых конструкций, данный метод можно применить для оценки технического состояния новых конструкций. Для этого рекомендуется в паспортные или сертификатные данные включить скорость звука, как один из важных параметров для оценки технического состояния конструкции. Наличие исходных значений данного параметра позволит в последующем следить за его изменением и на основании этого производить оценку технического состояния и рассчитать остаточный ресурс конструкции.

Основные результаты и выводы

1. Разработан метод оценки предельного состояния материала длительно эксплуатируемого магистрального газопровода, основанный на установлении корреляционной зависимости механических и акустических параметров металла труб. Применение метода позволяет повысить оперативность сбора информации о конструктивной надежности, снизить трудоемкость диагностирования предельного состояния.

2. Впервые получены критические значения скорости звука для материала длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов Севера, соответствующие предельному значению ударной вязкости.

3. Установлено, что длительная эксплуатация магистральных газопроводов Севера приводит к значительному снижению сопротивления трубного металла к хрупкому разрушению (снижению ударной вязкости и трещиностойкости) и уменьшению его акустических характеристик.

4. Решена задача по оценке остаточного ресурса материала магистральных газопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера, по изменению скорости распространения звуковой волны в материале трубы.

5. Разработанный метод оценки предельного состояния материала

магистральных газопроводов применен при проведении технического диагностирования участков магистрального газопровода Мастах–Берге–Якутск, в результате которого оценены реальные эксплуатационные характеристики и создана база данных исследуемых показателей для их дальнейшего мониторинга.

Наиболее значимые публикации по теме диссертации

1. Большаков А.М. Исследование ударной вязкости стали магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях Крайнего Севера /А.М.Большаков, А.В. Бурнашев// Деформация и разрушение материалов. 2018. №8. С.43-45. (0,5 п.л./0,42 п.л.)
2. Бурнашев А.В. Способ оценки предельного состояния труб длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов. /А.М. Большаков, А.В. Бурнашев// Деформация и разрушение материалов. 2019. №2. С.42-44. (0,375 п.л./ 0,35 п.л.)
3. Большаков А.М. Определение технического состояния участков подземной прокладки магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях криолитозоны Якутии / А.М. Большаков, А.Р. Иванов, К.Н. Большев, П.П. Пермяков, Я.М. Андреев, А.В. Бурнашев и др.// Газовая промышленность. 2019. №4 (783). С. 70-76. (0,875 п.л./0,2 п.л.)
4. Большаков А.М. Мониторинг ударной вязкости материала магистрального газопровода, длительно эксплуатирующегося в условиях Севера /А.М. Большаков, А.В. Бурнашев, В.М. Ефимов// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. №6. С. 64-68.(0,625 п.л./0,55п.л.)
5. Большаков А.М., Бурнашев А.В. Оценка предельного состояния магистральных газопроводов после длительной эксплуатации в условиях Севера // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. №2. С.43-45. – (0,375 п.л./0,35 п.л.).
6. Бурнашев А.В. Исследование изменения механических свойств стали магистрального газопровода после длительной эксплуатации в условиях криолитозоны / А.В. Бурнашев, А.М.Большаков// В сборнике: труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD-2018. Материалы симпозиума, посвященные 80-летию академика В.П. Ларионова. 2018. С.532-537.(0,125 п.л. /0,1 п.л.)
7. Бурнашев А.В. Исследование ударной вязкости сталей магистрального газопровода после 50-летней эксплуатации в условиях Крайнего Севера / А.В. Бурнашев, А.М.Большаков// В сборнике: XII-й международной конференции механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. 2018. с. 55.(0,1 п.л. /0,08 п.л.)
8. Андреев Я.М. Оперативное диагностирование непроектных участков магистральных газопроводов с применением акустических систем в сложных условиях криолитозоны / Я.М. Андреев, А.М. Большаков, А.В. Бурнашев // В сборнике: Безопасность и мониторинг

техногенных и природных систем материалы и доклады. 2018. С. 118-122. (0,1 п.л. /0,08 п.л.)

9. Способ определения предельного состояния материала магистральных газопроводов: пат. 2691751 Рос. Федерация / Бурнашев А.В., Большаков А. М. Федеральное государственное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук». №2018134635; заявл. 01.10.2018; опубл. 18.06.2019; бюл. №17.