

На правах рукописи



ЮШИН ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ОЦЕНКА КОРРОЗИОННО-УСТАЛОСТНОГО СОСТОЯНИЯ
НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ СРЕДАХ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(нефтяной и газовой промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2015

Диссертация выполнена на кафедре «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» ФГБОУ ВПО «УГТУ».

Научный руководитель:

Быков Игорь Юрьевич, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, Профессиональный инженер России, Заслуженный работник Республики Коми, профессор кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта.

Официальные оппоненты:

Кунина Полина Семеновна, доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник нефтяной и газовой промышленности РФ, заведующий кафедрой «Оборудование нефтяных и газовых промыслов» ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный технологический университет», г. Краснодар.

Ильин Владимир Владиславович, кандидат технических наук, ведущий инженер отдела по проектированию объектов Проектного офиса «Развитие Ярегского нефтяного месторождения» ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», г. Ухта.

Ведущая организация: Филиал ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта.

Защита состоится «13» марта 2015 года в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ухтинский государственный технический университет», а также на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Диссертации».

Автореферат разослан «12» февраля 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



М. М. Бердник

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Самыми распространенными факторами, влияющими на техническое состояние и срок службы насосно-компрессорных труб (НКТ), являются коррозионно-агрессивное влияние скважинной среды и циклические нагрузки, которые испытывают НКТ в процессе эксплуатации.

Как известно, минеральные соли, растворенные в пластовой жидкости, являются, наряду с другими коррозионно-агрессивными неуглеводородными примесями (S_2 , O_2 , CO_2 и др.), мощными активаторами развития электрохимической коррозии в поверхностной структуре сталей. Это приводит к перерождению металла и потере массы, нарушению формы и разрыву атомных связей, следствием чего является развитие сети коррозионных трещин, снижение прочностных свойств в сечении трубы, изъязвление и деформация витков резьбы, ослабление её натяга и разрушение резьбовых соединений. Процессы электрохимической коррозии существенно ускоряются под воздействием циклических нагрузок, возникающих как в результате спуско-подъемных операций и свинчивания-развинчивания труб, так и под влиянием многоцикловых напряжений, сопровождающих процесс подъема добываемого продукта фонтанным, газлифтным и любым механизированным способом. Это ускорение возникает в силу разрыхления поверхностной структуры стали под воздействием циклических нагрузок и проникновения минерализованных жидкостей внутрь межзеренного и внутризеренного пространства.

Таким образом, коррозионно-усталостное воздействие на техническое состояние НКТ является комплексным, зарождается под влиянием внешних факторов и развивается латентно до тех пор, пока признаки разрушения не становятся явными. Предотвратить возникновение аварийных разрушений возможно регулярным мониторингом технического состояния НКТ при работе их в минерализованных средах. Однако механизм его определения в отношении НКТ до настоящего времени изучен недостаточно полно. Поэтому представленная ра-

бота является актуальной, так как направлена на поиск закономерностей по оценке коррозионно-усталостного состояния насосно-компрессорных труб в процессе эксплуатации.

Цель работы

Оценка коррозионно-усталостного состояния насосно-компрессорных труб в минерализованных средах.

Основные задачи исследований

1. Анализ существующих методов оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ.
2. Формирование научно-методологического комплекса исследований.
3. Экспериментальные исследования сталей НКТ и обработка результатов испытаний.
4. Оценка влияния минерализованных пластовых вод на коррозионно-усталостное состояние НКТ.

Научная новизна предложенных методов и решений

1. Обоснован параметр удельного коэффициента коррозионного влияния вида $\delta K_{кор.} = K_{кор.} / \sigma_B$, необходимый для определения предела ограниченной выносливости $\sigma_{-1кор.}$ сталей НКТ в условиях минерализованных сред.

2. Найдены зависимости для расчета удельных коэффициентов коррозионного влияния $\delta K_{кор.}^{Ус}$ и $\delta K_{кор.}^{ЗТ}$ применительно к сталям НКТ групп прочности «Д», «К», «Е» и «Л» в условиях минерализации пластовых вод Усинского и Западно-Тэбукского нефтяных месторождений.

3. Установлено, что с повышением прочности исследованных марок сталей НКТ увеличивается их сопротивляемость коррозионно-усталостному разрушению в среде минерализованных пластовых вод, подчиняясь квадратичной зависимости вида $\sigma_B = A \cdot \delta K_{кор.}^2 - B \cdot \delta K_{кор.} + C$.

4. Получены эмпирические соотношения для определения предела ограниченной выносливости $\sigma_{-1кор.}$ сталей НКТ групп прочности «Д», «К», «Е» и «Л» в зависимости от предела кратковременной прочности σ_B , определяемого из вы-

ражения $\sigma_B = f(\delta K_{кор.})$ применительно к уровню минерализации пластовых жидкостей Усинского и Западно-Тэбукского нефтяных месторождений.

5. Предел ограниченной выносливости $\sigma_{-1кор.}$ материала НКТ в условиях коррозионной агрессии зависит от его упругих свойств μ , уровня минерализации M пластовых сред и определяется циклическим пределом текучести σ_{fc} , структурным фактором $d_{стр}$ и пороговым коэффициентом интенсивности напряжений K_{thr} , значения которых находят экспериментально-расчетным методом.

Основные защищаемые положения

1. Научно-методологический комплекс исследований для оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ.

2. Оценка влияния коррозионно-активных минерализованных пластовых вод на усталостную прочность сталей НКТ при циклическом нагружении.

3. Оценка предела ограниченной выносливости сталей НКТ в среде минерализованных пластовых вод.

4. Методы оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ по структурной прочности металла при циклическом нагружении в минерализованных пластовых водах.

5. Конструкция специализированного стенда для испытания работоспособности резьбовых соединений НКТ «ниппель – муфта» при свинчивании-развинчивании в коррозионных и абразивных средах.

Практическая значимость

1. Разработан и сформирован необходимый и достаточный комплекс методик для проведения исследований по оценке коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах.

2. Предложен порядок проведения расчета коэффициентов запаса по коррозионно-усталостной прочности структуры стали НКТ.

3. Предложен метод оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах с помощью расчета коэффициентов запаса по ограниченной выносливости K_σ , поврежденности структуры металла K_B , структур-

ной устойчивости сталей K_L и размерам текущей трещины K_T , что обеспечивает дублирующий мониторинг за техническим состоянием НКТ в процессе эксплуатации.

4. Рассмотрена перспектива развития методов оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах применительно к резьбовым соединениям. Для этой цели разработан специализированный стенд для испытания работоспособности трубных резьбовых соединений при свинчивании-развинчивании, позволяющий имитировать осевую нагрузку и влияние коррозионных и абразивных сред (заявка на изобретение № 2013138544, приоритет от 19.08.2013 г.).

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались на:

- IX–XII межрегиональных научно-практических конференциях «Современные проблемы нефтепромышленной и буровой механики» (УГТУ, г. Ухта, 5 февраля 2011 г., 4 февраля 2012 г., 9 февраля 2013 г., 8 февраля 2014 г.);
- XII–XV Международных молодежных научных конференциях «Севергеоэкотех–2011, 2012, 2013, 2014» (УГТУ, г. Ухта, 16–18 марта 2011 г., 21–23 марта 2012 г., 20–22 марта 2013 г., 26–28 марта 2014 г.);
- Научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников УГТУ (УГТУ, г. Ухта, 20–23 сентября 2011 г., 17–20 апреля 2012 г., 16–19 апреля 2013 г., 22–25 апреля 2014 г.);
- I и IV Республиканских научно-практических форумах «Инновационные технологии – основа развития национальной экономики» (КРАГСИУ, г. Сыктывкар, 16–17 октября 2012 г., 27–28 марта 2014 г.);
- III и IV Республиканских молодежных инновационных конвентах «Молодежь – будущему Республики Коми» (УГТУ, г. Ухта, 23 апреля 2013 г., 17–18 апреля 2014 г.);
- XIII Конкурсе молодых работников и специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» на лучшую научно-техническую разработку (ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», г. Усинск, 25–26 апреля 2013 г.);

▪ XIII открытой молодежной научно-практической конференции ОАО «Татнефть», посвященной 70-летию с начала разработки нефти в Республике Татарстан (ОАО «Татнефть», НГДУ «Альметьевнефть», г. Альметьевск, 20 сентября 2013 г.).

Публикации

Основные результаты исследований опубликованы в 13 работах, в том числе: 10 – в материалах научных конференций, 3 – в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 155 наименований, 8 приложений, содержит 178 страниц текста, включая 33 рисунка и 37 таблиц. Общий объем работы с приложениями составляет 190 страниц.

Благодарности

Автор выражает благодарность и глубокую признательность своему научному руководителю – доктору технических наук, профессору, академику РАН Быкову Игорю Юрьевичу за внимательное отношение и неоценимую помощь на всех этапах работы над диссертацией, а также сотрудникам кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности» УГТУ за консультации и ценные рекомендации в процессе подготовки диссертации.

Автор благодарен и признателен ректору УГТУ, доктору технических наук, профессору, академику РАН Цхадая Николаю Денисовичу за создание оптимальных условий для проведения исследований и написания диссертации.

Автор выражает искреннюю благодарность проректору по научной работе и инновационной деятельности УГТУ, кандидату технических наук Кулешову Владиславу Евгеньевичу за всестороннюю помощь в организации экспериментов и апробации результатов работы.

Автор благодарен руководству Сосногорского газоперерабатывающего завода филиала ООО «Газпром переработка» в лице директора Дегтева Юрия Леонидовича и главного механика Литина Валерия Дмитриевича, а также

директору Ухтинского филиала ООО «Газпромтранс» Морозову Сергею Нафанаиловичу за оказанное содействие при подготовке экспериментов.

Автор особо признателен Г. Л. Игнашову, А. А. Майеру и В. Б. Сергееву за техническую помощь на этапах проведения исследовательских работ, а также В. Я. Махавкину за рекомендации при оформлении патентной заявки.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы.

В первой главе проанализированы существующие методы оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах, а также сформулированы цель и основные задачи исследований.

Анализ научных трудов ученых В. А. Аванесова, Э. А. Айзуппе, В. Ф. Бочарникова, И. Ю. Быкова, С. Ю. Вагапова, И. И. Василенко, В. Н. Ивановского, Г. В. Карпенко, В. П. Когаева, Б. В. Копея, В. И. Похмурского, В. Н. Протасова, В. В. Романова, А. В. Рябченкова, А. Е. Сарояна, Н. А. Северинчика, Д. Г. Селиванова, С. В. Серенсена, Л. А. Сосновского, В. Ф. Терентьева, В. Т. Трощенко, К. Р. Уразакова, Н. Д. Цхадая, Н. К. Birnbaum, К. А. Blenkarn, D. L. Henry, J. P. Hirth, A. Lubinski, I. M. Robertson и других авторов показывает, что при воздействии агрессивных коррозионных сред на структуру металла при переменном циклическом нагружении происходит поверхностное адсорбционное понижение прочности, ведущее к интенсивному развитию сети трещинных дефектов, проникающих вглубь металла и снижающих его структурную прочность. Из анализа следует, что наиболее частыми причинами разрушения НКТ являются обрывы колонн вследствие усталости под воздействием переменных циклических нагрузок, нарушение целостности и герметичности резьбовых соединений и коррозия внутренней и наружной поверхности труб и резьб, что ведет к возникновению аварий и снижению темпов добычи нефти.

Анализ методов диагностики, контроля технического состояния и прогноза коррозионно-усталостного состояния колонн НКТ показал, что существующие

нормативные документы, регламентирующие проведение инспекционных мероприятий с НКТ, не содержат этапа по определению усталостной прочности трубных сталей лифтовых колонн при циклическом нагружении как в воздухе, так и в агрессивных минерализованных коррозионных средах, что, несомненно, является важным при расчете ресурсных показателей и оценке коррозионно-усталостного состояния НКТ.

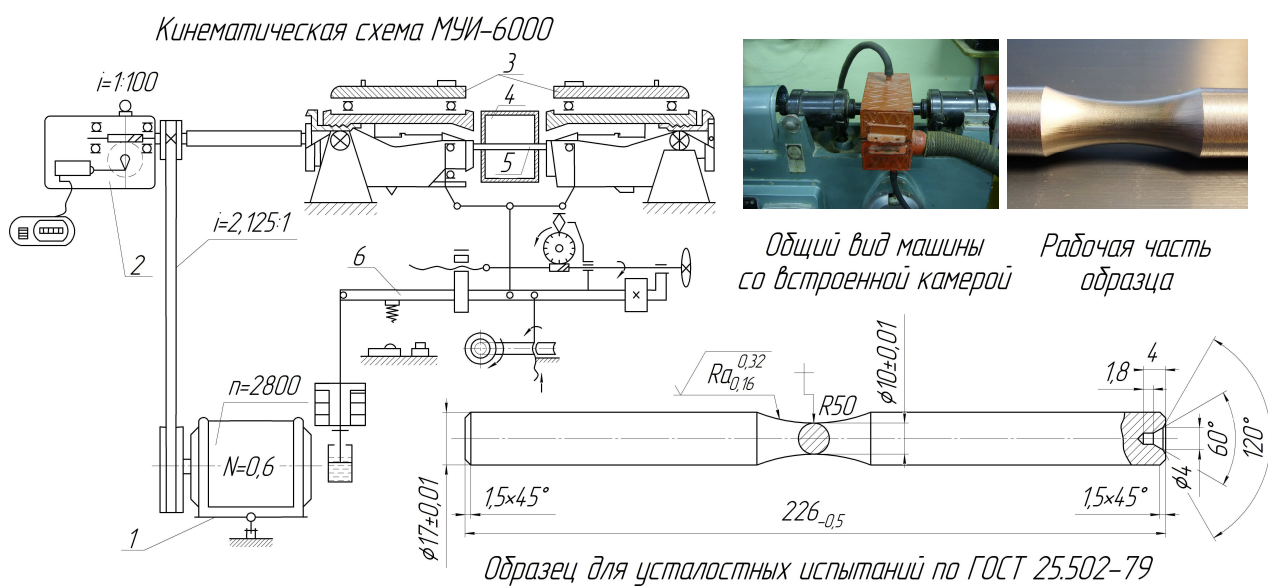
Таким образом, разработка методов оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах весьма актуальна и является целью диссертационной работы.

Во второй главе разработан необходимый и достаточный научно-методический комплекс применяемых в диссертационной работе методик исследований, обеспечивающих оценку коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах.

Сформированный научно-методический комплекс включает методику визуального и измерительного контроля для выявления деформаций, поверхностных трещин, расслоений и других несплошностей, а также для оценки допустимости дефектов структуры металла; методику определения химического состава сталей НКТ с целью установления соответствия массовых долей основных элементов требованиям нормативной документации и сертификата качества на продукцию; методику определения твердости для уточнения основных механических характеристик, расчета уровней испытательных напряжений при проведении коррозионно-усталостных испытаний и оценки структурных прочностных показателей сталей НКТ; методику металлографических исследований, направленную на определение зернистости, оценку микроструктуры и выявление неметаллических включений в сталях НКТ; методику коррозионно-усталостных испытаний с целью установления предела выносливости сталей НКТ в воздухе и в среде пластовых вод нефтяных месторождений. Научно обоснованное планирование эксперимента, статистическая корректность измерений и достоверность обеспечивается методикой статистической обработки результатов испытаний.

В третьей главе представлены методика и результаты экспериментальных исследований сталей НКТ. Коррозионно-усталостные испытания образцов металлов диаметром 10 мм проводились на машине МУИ–6000, кинематическая схема которой представлена на рисунке 1.

Особенностью этой машины является встроенная в конструкцию специальная проточная камера 4, обеспечивающая подачу минерализованной пластовой жидкости на исследуемый образец 5, изготавливаемый в соответствии с ГОСТ 25.502–79 и закрепляемый в этой камере.



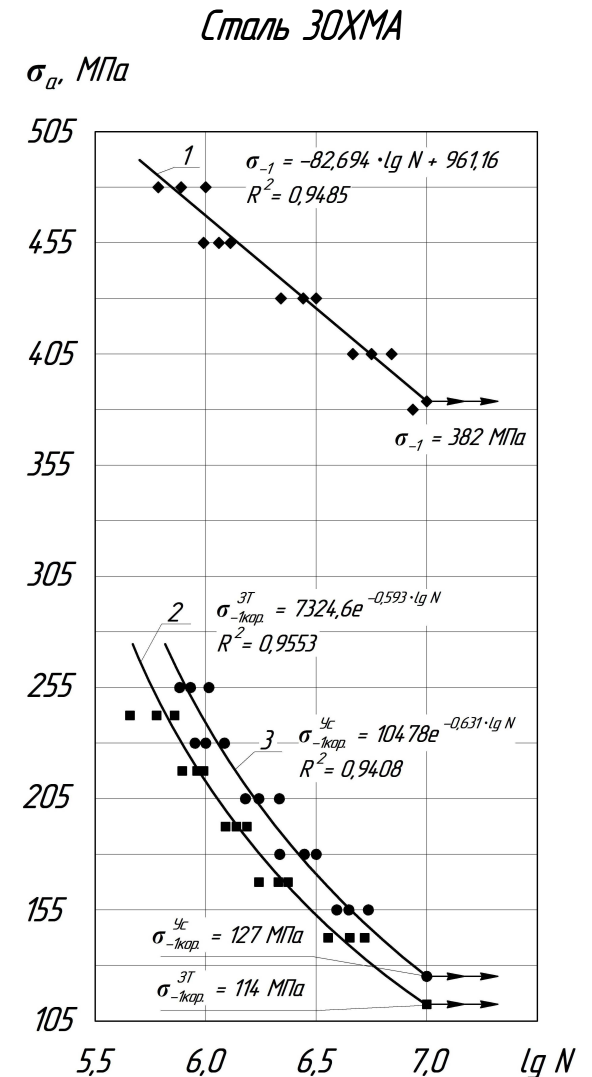
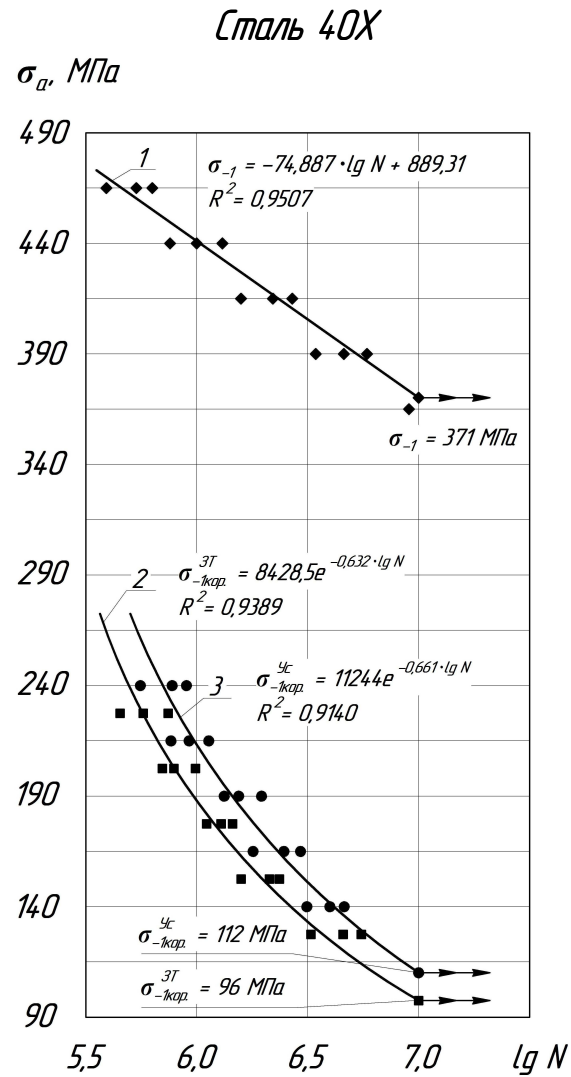
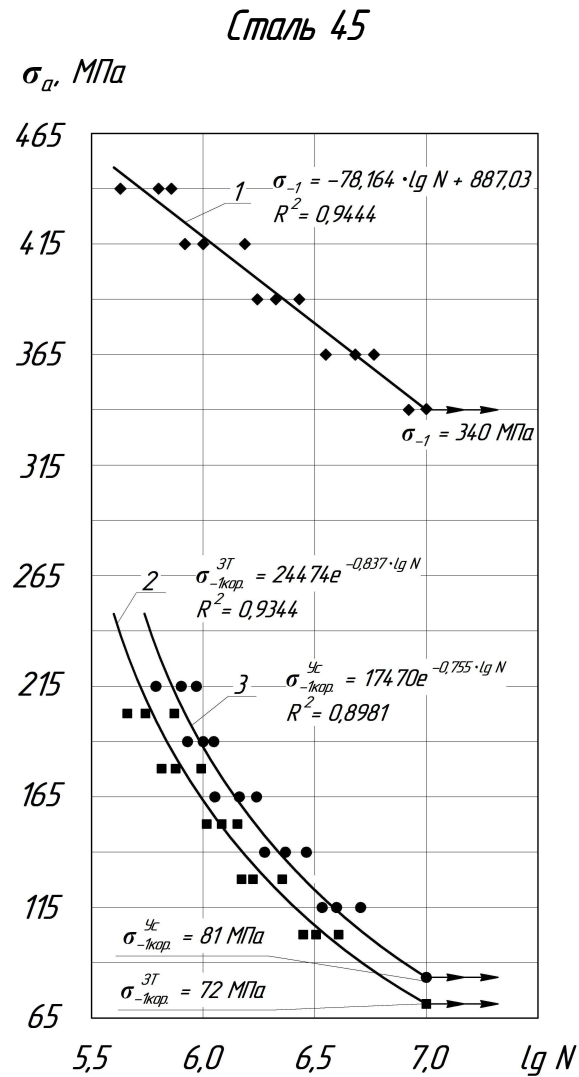
1 – электропривод; 2 – счетчик циклов; 3 – зажимное устройство; 4 – проточная камера; 5 – испытуемый образец; 6 – рычажный механизм

Рисунок 1 – Кинематическая схема машины МУИ–6000

Испытания проводили с частотой 6000 циклов/мин на 5 уровнях напряжений для каждой из марок сталей НКТ в сухом воздухе и пластовых водах с различной минерализацией. Кривые усталости (1) и коррозионной усталости (2 и 3) гладких образцов металлов диаметром 10 мм приведены на рисунке 2. Результаты испытаний сравнили с расчетными значениями, полученными из эмпирического выражения С. Л. Жукова, и свели в таблицу 1. При этом формула для расчета критерия σ_{-1}/σ_B с учетом формулы С. Л. Жукова получила вид, МПа

$$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} = 0,27 + 185 \cdot \sigma_B^{-1}, \quad (1)$$

где σ_{-1} – предел выносливости стали в сухом воздухе, МПа; σ_B – предел кратковременной прочности стали, МПа



1 – в сухом воздухе; 2 – в среде пластовых вод Западно-Тэбукского нефтяного месторождения (M = 129,2 г/л; N = 7,722 мг O₂/л);
3 – в среде пластовых вод Усинского нефтяного месторождения (M = 79,5 г/л; N = 7,214 мг O₂/л)

Рисунок 2 – Кривые усталости (1) и коррозионной усталости (2 и 3) гладких образцов металлов диаметром 10 мм

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов металлов диаметром 10 мм

Марка стали	Предел кратковременной прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Предел выносливости в сухом воздухе σ_{-1} , МПа	Критерий $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}$			$\sigma_{-1кор}^{Ус}$ МПа	$\sigma_{-1кор}^{ЗТ}$ МПа	Критерий $\frac{\sigma_{-1кор}}{\sigma_B}$	
				Результаты испытаний	Результаты по С. Л. Жукову	Относительная ошибка, %			$\frac{\sigma_{-1кор}^{Ус}}{\sigma_B}$	$\frac{\sigma_{-1кор}^{ЗТ}}{\sigma_B}$
45	663	468	340	0,513	0,549	7,0	81	72	0,12	0,11
40Х	747	561	371	0,497	0,517	4,0	112	96	0,15	0,13
30ХМА	776	603	382	0,492	0,512	4,1	127	114	0,17	0,15

Примечание: $\sigma_{-1кор}^{Ус}$, $\sigma_{-1кор}^{ЗТ}$ – предел ограниченной выносливости сталей НКТ в среде пластовых вод Усинского (Ус) и Западно-Тэбукского (ЗТ) нефтяных месторождений, МПа

Как видно, полученные и расчетные значения разнятся в пределах 4÷7 %, что свидетельствует о корректности выполненных испытаний. В результате экспериментальных исследований определены также основные механические характеристики сталей НКТ, принятых к исследованию (45, 40Х, 30ХМА), их зернистость d_z и найдены зависимости коррозионно-усталостной долговечности $\lg N$ от максимальных амплитудных значений цикла σ_a . Экспериментально установлено, что в минерализованных средах предел выносливости снижается в 3,0÷4,5 и более раз. Все полученные зависимости необходимы для последующей оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ, работающих в минерализованных средах.

В четвертой главе представлена оценка предела ограниченной выносливости сталей НКТ в среде минерализованных пластовых вод для условий Усинского и Западно-Тэбукского нефтяных месторождений в диапазоне групп прочностей «Д», «К», «Е» и «Л»; разработана методика оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ по структурной прочности металла в минерализованных средах и представлены расчетные зависимости для вычисления коэффициентов запаса по ограниченной выносливости K_σ поврежденности структуры ме-

талла K_D , структурной устойчивости K_L и размерам текущей трещины K_T сталей НКТ в минерализованных средах.

Коэффициент $K_{кор.}$ коррозионного влияния пластовых вод на усталостную прочность сталей НКТ по результатам механических испытаний при минерализации M , г/л, рассчитывался по известной зависимости (ГОСТ 25.504–82):

$$K_{кор.} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1кор.}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{-1кор.}$ – предел ограниченной выносливости стали в среде пластовых вод, МПа.

Полученные результаты сравнили с коррозионно-усталостными исследованиями, проведенными в б. Ивано-Франковском институте нефти и газа для стали марки 40ХН перлитно-ферритного структурного состояния с различными значениями предела кратковременной прочности ($\sigma_B = 705$ МПа; $\sigma_B = 785$ МПа) в водах, минерализованных NaCl при уровне минерализации среды $M = 79,5$ и $M = 129,2$ г/л. Для этой цели нашли значения удельных коэффициентов $\delta K_{кор.}$ коррозионного влияния (таблица 2), которые определены на единицу прочности σ_B анализируемых сталей НКТ для растворов NaCl и пластовых вод различной минерализации Усинского и Западно-Тэбукского нефтяных месторождений. Эти значения определялись по формуле:

$$\delta K_{кор.} = \frac{K_{кор.}}{\sigma_B} \quad (3)$$

Таблица 2 – Значения удельного коэффициента $\delta K_{кор.}$ коррозионного влияния

Марка стали	σ_B , МПа	Изменение удельного коэффициента $\delta K_{кор.}$ коррозионного влияния, $\times 10^3$			
		$M = 79,5$ мг/л		$M = 129,2$ мг/л	
		Ус	Раствор NaCl	ЗТ	Раствор NaCl
45	663	5,91	–	6,63	–
40ХН*	705	–	5,07	–	6,02
40Х	747	4,43	–	5,18	–
30ХМА	776	3,87	–	4,32	–
40ХН**	785	–	3,64	–	4,30

Примечание: под символами * и ** отмечены марки сталей по исследованиям, проведенным в б. Ивано-Франковском институте нефти и газа в растворах NaCl; σ_B – предел кратковременной прочности, МПа; M – уровень минерализации, г/л; Ус – пластовая вода Усинского нефтяного месторождения; ЗТ – пластовая вода Западно-Тэбукского нефтяного месторождения

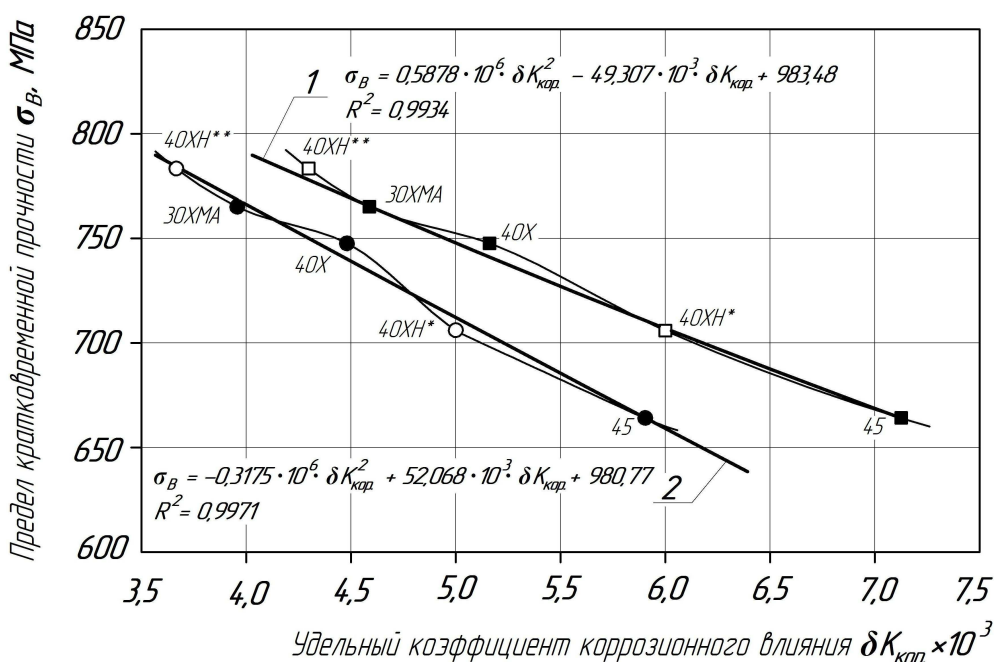
Затем построили совместные графики (рисунок 3), отражающие зависимость изменения удельного коэффициента коррозионного влияния от предела кратковременной прочности сравниваемых сталей НКТ. Как видно, полученные графики закономерно аппроксимируются квадратичными зависимостями вида:

– Усинское нефтяное месторождение ($M = 79,5$ г/л)

$$\sigma_B = -0,3175 \cdot 10^6 \cdot \delta K_{кор}^2 - 52,068 \cdot 10^3 \cdot \delta K_{кор} + 980,77 \quad (4)$$

– Западно-Тэбукское нефтяное месторождение ($M = 129,2$ г/л)

$$\sigma_B = 0,5878 \cdot 10^6 \cdot \delta K_{кор}^2 - 49,307 \cdot 10^3 \cdot \delta K_{кор} + 983,48 \quad (5)$$



1 – Западно-Тэбукское нефтяное месторождение; 2 – Усинское нефтяное месторождение

Светлые точки – расчетные значения для стали 40XH по исследованиям, проведенным в б. Ивано-Франковском институте нефти и газа; Темные точки – результаты по сталям 45, 40X и 30XMA

Рисунок 3 – Зависимость изменения удельного коэффициента коррозионного влияния от предела кратковременной прочности сравниваемых сталей НКТ

Коэффициент аппроксимации при этом составляет $R^2 = 0,99$, что свидетельствует о корректности выполненных исследований и предложенного метода анализа. Отсюда можно получить обобщенное аналитическое выражение для определения удельных коэффициентов $\delta K_{кор}$ коррозионного влияния:

– Усинское нефтяное месторождение ($M = 79,5$ г/л)

$$\delta K_{кор}^{Ус} = \left(\sqrt{9814,99 - 3,150 \cdot \sigma_B} - 82,00 \right) \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

– Западно-Тэбукское нефтяное месторождение ($M = 129,2$ г/л)

$$\delta K_{\text{кор.}}^{3T} = (41,94 - \sqrt{86,05 + 1,703 \cdot \sigma_B}) \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Показатель удельного коэффициента $\delta K_{\text{кор.}}$ коррозионного влияния необходим для расчета предела ограниченной выносливости $\sigma_{-1\text{кор.}}$ любых марок сталей НКТ в рассматриваемом диапазоне прочностей и минерализации сред.

Для этой цели воспользовались примерной зависимостью, рекомендованной в ГОСТ 25.504–82 для расчета предела выносливости сталей σ_{-1} , МПа, через известный предел кратковременной прочности σ_B , МПа

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001 \cdot \sigma_B) \cdot \sigma_B \quad (8)$$

Сравнив рассчитанные значения, полученные из выражения (8), с экспериментальными данными, приведенными в таблице 1, оказалось, что относительная ошибка при вычислении предела выносливости металла по формуле (8) для стали 45 не превысила 6,0 %, для стали 40Х оказалась равной 4,5 %, а для стали 30ХМА составила 4,2 % при среднем значении в 4,9 %.

Учитывая это, ввели поправочный коэффициент равный 1,05 и с учетом (2) и (3) получили выражение для расчета предела ограниченной выносливости $\sigma_{-1\text{кор.}}$, МПа, для рассматриваемых сталей НКТ в среде пластовых вод Усинского и Западно-Тэбукского нефтяных месторождений, МПа

$$\sigma_{-1\text{кор.}} = 1,05 \cdot \frac{\sigma_{-1}}{\delta K_{\text{кор.}} \cdot \sigma_B} \quad (9)$$

Учитывая (6) и (7), эмпирические зависимости для определения предела ограниченной выносливости рассматриваемых сталей НКТ будут иметь вид:

– Усинское нефтяное месторождение $\sigma_{-1\text{кор.}}^{\text{Ус}}$, МПа

$$\sigma_{-1\text{кор.}}^{\text{Ус}} = \frac{577,5 - 0,105 \cdot \sigma_B}{\sqrt{9814,99 - 3,150 \cdot \sigma_B} - 82,00} \quad (10)$$

– Западно-Тэбукское нефтяное месторождение $\sigma_{-1\text{кор.}}^{3T}$, МПа

$$\sigma_{-1\text{кор.}}^{3T} = \frac{577,5 - 0,105 \cdot \sigma_B}{41,94 - \sqrt{86,05 + 1,703 \cdot \sigma_B}} \quad (11)$$

Таким образом, на основе экспериментальных исследований получены

аналитические зависимости для определения предела ограниченной выносливости сталей НКТ в условиях минерализации Усинского ($M \approx 80$ г/л) и Западно-Тэбукского ($M \approx 130$ г/л) нефтяных месторождений, что, в свою очередь, позволяет оценить коррозионно-усталостное состояние НКТ по результатам текущего контроля. Текущий контроль параметров коррозионно-усталостного состояния осуществляется путем мониторинга динамики развития микро- и макротрещинных структурных дефектов. Размер этих дефектов может быть определен исходя из известной теории через коэффициент пороговой интенсивности напряжений K_{th} , зависящий от структурных особенностей стали (зернистости d_3) и текущих прочностных свойств (σ_T , σ_B , ψ).

Коэффициент пороговой интенсивности напряжений K_{th0} при отнулевом цикле нагружения (коэффициент асимметрии $r = 0$), $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$, определяется:

$$K_{th0} = \sqrt{\frac{R_{MCe}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot D_{\pi}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot 4 \cdot \pi \cdot d_{стр}}{1,7 \cdot \sigma_T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)}}}, \quad (12)$$

где R_{MCe} – критерий сопротивления микросколу стали в деформированном состоянии с учетом повышения первого главного напряжения в случае сложнапряженного состояния, МПа; m – коэффициент степенного упрочнения стали при пластическом деформировании; D_{π} – коэффициент перенапряжения, учитывающий повышение предела выносливости в случае сложнапряженного состояния; $d_{стр}$ – эффективный диаметр элемента, определяющий свойства пластически сформированной структуры и зависящий от размера зерна стали, м; σ_T – предел текучести стали, МПа.

По гипотезе М. Huber и R. Mises максимальный размер микродефекта l_{max} , м, не влияющий на процесс усталостного повреждения стали:

$$l_{max} = k \cdot \left(\frac{K_{th-1}}{\sigma_T} \right)^2, \quad (13)$$

где k – коэффициент для гипотезы М. Huber и R. Mises, $k = 0,03$; K_{th-1} – коэффициент пороговой интенсивности напряжений при симметричном цикле нагружения ($r = -1$), $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

$$K_{th-1} = \frac{\Delta K_{th-1}}{1-r}, \quad (14)$$

где ΔK_{th-1} – предельный размах коэффициента пороговой интенсивности напряжений при симметричном цикле ($r = -1$), $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$

Предел выносливости σ_{-1H} , МПа, неповрежденной структуры сталей определяется выражением, содержащим максимальный размер микродефекта l_{max} , м

$$\sigma_{-1H} = \frac{\sigma_{fc}}{\sqrt{\pi \cdot l_{max} \cdot \left(\frac{\sigma_{fc}}{K_{th-1}} \right)^2 + 1 - \mu + \mu^2}} \quad (15)$$

где σ_{fc} – циклический предел текучести, МПа; μ – коэффициент Пуассона.

Предельная поврежденность $D_{-1кор.разр.}$ стали НКТ в среде пластовых вод

$$D_{-1кор.разр.} = \frac{\sigma_{-1H} - \sigma_{-1кор.}}{\sigma_{-1H}} \quad (16)$$

Значение текущей $\sigma_{-1Г кор.}$ ограниченной выносливости стали НКТ в среде минерализованных пластовых вод рассчитываются по известному измеренному методами неразрушающего контроля значению текущей длины трещины $L_{-1Г кор.}$ согласно зависимости (15).

Тем самым, рассчитав значение текущей ограниченной выносливости $\sigma_{-1Г кор.}$, можно вычислить коэффициент запаса K_{σ} по ограниченной выносливости сталей НКТ до разрушения в среде минерализованных пластовых вод:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1Г кор.}}{\sigma_{-1кор.}} > 1 \quad (17)$$

Текущая поврежденность $D_{-1Г кор.}$ металла в среде минерализованных пластовых вод может быть рассчитана с использованием зависимости (16) по значению текущей ограниченной выносливости $\sigma_{-1Г кор.}$ стали НКТ.

Коэффициент запаса K_D по поврежденности структуры металла до разрушения НКТ рассчитывается:

$$K_D = \frac{D_{-1кор.разр.}}{D_{-1Г кор.}} > 1 \quad (18)$$

Длина макротрещины разрушения сталей НКТ при испытаниях под воздействием пластовой воды $L_{-1кор.разр.}$, м, вычисляется:

$$L_{-1кор.разр.} = \frac{K_{th-1}^2 \cdot \left(\frac{\sigma_{fc}^2}{\sigma_{-1кор.}^2} - 1 + \mu - \mu^2 \right)}{\pi \cdot \sigma_{fc}^2} \quad (19)$$

Стадия развития микродефектов, не влияющих на процесс усталостного повреждения стали, характеризует ее структурную устойчивость, тогда отношение длины предельного микродефекта l_{\max} к текущей длине трещины $L_{-1T \text{ кор.}}$ (при условии $l_{\max} > L_{-1T \text{ кор.}}$) будет представлять собой коэффициент запаса K_L структурной устойчивости стали НКТ в минерализованных средах:

$$K_L = \frac{l_{\max}}{L_{-1T \text{ кор.}}} > 1 \quad (20)$$

При текущей длине трещины $L_{-1T \text{ кор.}} > l_{\max}$ коэффициент запаса K_T по росту трещины до разрушения НКТ рассчитывается:

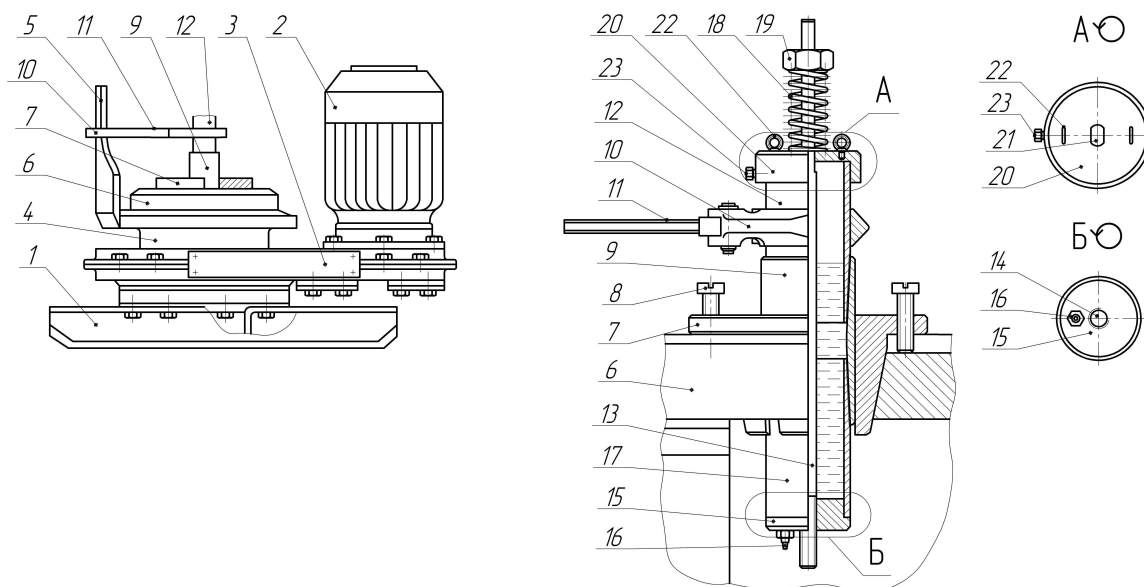
$$K_T = \frac{L_{-1\text{кор.разр.}}}{L_{-1T \text{ кор.}}} > 1 \quad (21)$$

Перспектива развития методов оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах актуальна не только в области исследований параметров прочности структуры металла, но и имеет существенную практическую значимость при проведении экспериментов на работоспособность натуральных резьбовых соединений НКТ «ниппель – муфта» при многократном свинчивании-развинчивании в коррозионных и абразивных жидкостях.

Для этой цели разработан специализированный стенд (рисунок 4), позволяющий имитировать и проводить испытания, приближенные к натурным условиям работы резьбовых соединений НКТ с учетом многообразия применяемых смазок и методов упрочнения трущихся поверхностей.

Стенд работает следующим образом. Муфта 9 испытуемого образца удерживается неподвижно в устройстве зажимном 7, выполненном в виде секторных клиньев с механизмом раскрепления, например, в виде винтов раскрепительных 8, и размещается в конусообразном седле центратора 6, опирающегося на станину 1. В верхнюю часть муфты 9 ввинчивается ниппель 12 испытуемого образца и обжимается трубным ключом 10, оснащенным регистратором 11 момента раскрепления резьбового соединения, например, динамометрическим ключом. Вращение трубного ключа 10 осуществляется водилом 5 с помощью вращателя 4, обеспечивающего затяжку резьбового соединения с заданным

крутящим моментом и приводимым во вращение в прямом и обратном направлениях через шестеренчатый редуктор 3 с помощью электропривода 2. Вращение трубного ключа 10 по часовой стрелке обеспечивает свинчивание резьбового соединения с заданным крутящим моментом, против часовой стрелки – развинчивание резьбового соединения с регистрацией момента его раскрепления.



1 – станина; 2 – электропривод; 3 – шестеренчатый редуктор; 4 – вращатель; 5 – водило; 6 – центратор; 7 – устройство зажимное; 8 – винт раскрепительный; 9 – муфта резьбового соединения; 10 – ключ трубный горизонтальный усиленный; 11 – регистратор момента раскрепления; 12 – ниппель резьбового соединения; 13 – стержень центральный; 14 – отверстие резьбовое; 15 – заглушка донная; 16 – штуцер сливной; 17 – контейнер замкнутый; 18 – пружина силовая; 19 – гайка затяжная; 20 – крышка съемная; 21 – отверстие центральное; 22 – рым-болт; 23 – фиксатор

Рисунок 4 – Стенд для испытания работоспособности резьбовых соединений НКТ при свинчивании-развинчивании в коррозионных и абразивных средах

Для имитации осевой нагрузки на резьбовое соединение конструкция испытуемого образца снабжена пружиной 18, которая размещается на верхнем конце стержня 13 между крышкой 20 и гайкой 19. Такой прием позволяет создать заданную осевую нагрузку на резьбовое соединение путем сжатия пружины 18 с помощью затяжной гайки 19. При этом крышка 20 служит опорой для пружины 18 и фиксируется на ниппеле 12 от проворачивания фиксатором 23. Кроме того, для обеспечения синхронного вращения ниппеля 12 и стержня 13, его верхний конец выполнен с двусторонней лыской, а отверстие 21 образует ответную форму в виде прямоугольника со скругленными короткими сторо-

нами. При этом стержень 13 пропущен через всю конструкцию испытуемого образца и нижним концом свободно ввинчен в резьбу 14 заглушки донной 15. При свинчивании-развинчивании резьбового соединения стержень 13 синхронно ввинчивается или вывинчивается из резьбового отверстия 14 донной заглушки 15, сохраняя постоянство сжатия силовой пружины 18, имитирующей осевую нагрузку на резьбовое соединение в процессе всего цикла испытаний.

Конструкция испытуемого образца 9, 12 оснащена контейнером замкнутым 17 для имитации солевой или другой (абразивной, щелочной, кислотной и т.п.) агрессии на резьбовое соединение. Контейнер замкнутый 17 оснащен заглушкой 15 с резьбовым отверстием 14 и подсоединен на резьбе к нижней части муфты 9. При этом внутри испытуемого образца 9, 12 образуется замкнутый объем, который заполняют агрессивной коррозионной или другой средой, например, пластовой водой, щелочью, кислотой, абразивной жидкостью и т.п. При свинчивании-развинчивании резьбового соединения агрессивная среда периодически воздействует на поверхность резьбы. Для слива жидкости после окончания эксперимента или замены ее в процессе испытаний служит штуцер сливной 16. Для извлечения конструкции испытуемого образца в сборе из зажимного устройства 7 служат рым-болты 22.

По предложенной конструкции специализированного стенда для испытания работоспособности резьбовых соединений НКТ в ФГБУ ФИПС направлена заявка на изобретение № 2013138544, приоритет от 19.08.2013 г.

Основные выводы

1. Выполнен анализ существующих методов оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах. Установлено, что наиболее частыми причинами разрушения НКТ являются обрыв колонны вследствие усталости под воздействием переменных циклических нагрузок, нарушение целостности и герметичности резьбовых соединений и коррозия внутренней и наружной поверхности труб и резьб. Все это ведет к возникновению аварий и

снижению темпов добычи нефти. В связи с этим, разработка методов оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах весьма актуальна и является целью диссертационной работы.

2. Разработан необходимый и достаточный комплекс методик для проведения исследований по оценке коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах, включающий методику визуального и измерительного контроля, методов неразрушающего диагностирования, определения химического состава сталей, их прочностных и структурных характеристик, а также методику коррозионно-усталостных испытаний.

3. В результате экспериментальных исследований определены основные механические характеристики сталей НКТ, принятых к исследованию (45, 40Х, 30ХМА), их зернистость d_3 и найдены зависимости коррозионно-усталостной долговечности $\lg N$ от максимальных амплитудных напряжений σ_a цикла. Установлено, что в минерализованных средах предел выносливости снижается в 3,0÷4,5 и более раз. Полученные результаты позволили определить коэффициент $K_{кор.}$ коррозионного влияния минерализованных пластовых вод на усталостную прочность стали НКТ.

4. Установлено, что коэффициент $K_{кор.}$ коррозионного влияния, отнесенный к единице прочности стали, представляет собой удельный показатель $\delta K_{кор.}$, зависит от предела кратковременной прочности стали σ_B , МПа, и минерализации M , г/л, пластовой среды воздействия. Показано, что полученные зависимости соответствуют результатам исследований, проведенных в б. Ивано-Франковском институте нефти и газа на растворах NaCl, с аппроксимацией $R^2 = 0,99$. На основании удельного показателя $\delta K_{кор.}$ получены эмпирические выражения, позволяющие рассчитать предел ограниченной выносливости $\sigma_{-1кор.}$ сталей групп прочности «Д», «К», «Е» и «Л» для условий Усинского и Западно-Тэбукского нефтяных месторождений. При необходимости аналогичные выражения могут быть получены для любого типа пластовых вод.

5. На основе полученных параметров зернистости d_3 и предела ограничен-

ной выносливости $\sigma_{-1\text{кор.}}$ найдены выражения для расчета длин не критичных l_{max} и критичных $L_{-1\text{кор.разр.}}$ трещин, характеризующих стадии латентного накопления микродефектов и их развития до разрушения стали в минерализованных средах. Эти выражения положены в основу расчета предела ограниченной выносливости $\sigma_{-1\text{H}}$ неповрежденной структуры стали НКТ, текущий предел ограниченной выносливости $\sigma_{-1\text{Ткор.}}$, предельную $D_{-1\text{кор.разр.}}$ и текущую $D_{-1\text{Ткор.}}$ поврежденности стали в минерализованных средах.

6. Предложен метод оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах с помощью расчета коэффициентов запаса по ограниченной выносливости K_σ , поврежденности структуры металла K_D , структурной устойчивости сталей K_L и размерам текущей трещины K_T , что обеспечивает дублирующий мониторинг за техническим состоянием НКТ в процессе эксплуатации.

7. Рассмотрена перспектива развития методов оценки коррозионно-усталостного состояния НКТ в минерализованных средах применительно к резьбовым соединениям. Для этого разработан специализированный стенд для испытаний трубных резьбовых соединений при свинчивании-развинчивании, позволяющий имитировать осевую нагрузку и влияние коррозионных и абразивных сред (заявка на изобретение № 2013138544, приоритет от 19.08.2013 г.).

**Основные положения и наиболее значимые результаты диссертации
опубликованы в следующих работах:**

1. Юшин, Е. С. Факторы, влияющие на разрушение насосно-компрессорных труб / Е. С. Юшин, И. Ю. Быков // XII Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех–2011»: материалы конференции (16–18 марта 2011 г., Ухта): в 5 ч.; ч. 5. – Ухта : УГТУ, 2011. – С. 173–177.

2. Юшин, Е. С. Машина для проведения коррозионно-усталостных испытаний образцов при изгибе с вращением МУИ–6000 / Е. С. Юшин, И. Ю. Быков

// Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (20–23 сентября 2011 г., Ухта): в 3 ч.; ч. 1 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2011. – С. 192–196.

3. Юшин, Е. С. К методике коррозионно-усталостных испытаний образцов НКТ при изгибе с вращением на машине МУИ–6000 / Е. С. Юшин, И. Ю. Быков // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – № 12. – С. 23–26.

4. Юшин, Е. С. Методика проведения коррозионно-усталостных испытаний образцов из материалов насосно-компрессорных труб / Е. С. Юшин, И. Ю. Быков // XIII Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех–2012»: материалы конференции (21–23 марта 2012 г., Ухта): в 6 ч.; ч. 6. – Ухта : УГТУ, 2012. – С. 76–80.

5. Юшин, Е. С. Экспериментальные исследования сталей для изготовления НКТ / Е. С. Юшин, И. Ю. Быков // XIV Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех–2013»: материалы конференции (20–22 марта 2013 г., Ухта): в 5 ч.; ч. 4. – Ухта : УГТУ, 2013. – С. 212–216.

6. Юшин, Е. С. К методике проведения стендовых испытаний резьбовых соединений НКТ / И. Ю. Быков, Е. С. Юшин // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (16–19 апреля 2013 г., Ухта): в 3 ч.; ч. 1 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2013. – С. 240–243.

7. Юшин, Е. С. Пути совершенствования методов прогноза коррозионно-усталостного разрушения насосно-компрессорных труб / Е. С. Юшин // XIII открытая молодежная научно-практическая конференция ОАО «Татнефть», посвященная 70-летию начала разработки нефти в Республике Татарстан: материалы конференции (20 сентября 2013 г., Альметьевск). – Альметьевск : ОАО «Татнефть», 2013 – С. 298.

8. Юшин, Е. С. Результаты коррозионно-усталостных испытаний сталей для насосно-компрессорных труб в пластовой воде нефтяных месторождений / Е. С. Юшин, И. Ю. Быков // XV Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех–2014»: материалы конференции (26–28 марта 2014 г.,

Ухта) : в 5 ч.; ч. 3. – Ухта : УГТУ, 2014. – С. 59–63.

9. Юшин, Е. С. Оценка влияния пластовой воды на усталостную прочность сталей для насосно-компрессорных труб / И. Ю. Быков, Е. С. Юшин // Всероссийская научно-практическая конференция «Нефтегазовый комплекс: образование, наука и производство»: материалы конференции (14–18 апреля 2014 г., Альметьевск) : в 2 ч.; ч. 2. – Альметьевск : АГНИ, 2014. – С. 354–359.

10. Юшин, Е. С. К методике оценки выносливости сталей для насосно-компрессорных труб под воздействием пластовых вод Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции / Е. С. Юшин, И. Ю. Быков // Сборник научных трудов: материалы научно-технической конференции (22–25 апреля 2014 г., Ухта): в 3 ч.; ч. 1 / под ред. Н. Д. Цхадая. – Ухта : УГТУ, 2014. – С. 121–126.

11. Юшин, Е. С. Влияние эксплуатационных пластовых вод на выносливость сталей для насосно-компрессорных труб / И. Ю. Быков, Е. С. Юшин // XIII Международная молодежная научно-техническая конференция «Будущее технической науки»: материалы конференции (23 мая 2014 г., Нижний Новгород). – Нижний Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. – С. 231–232.

12. Юшин, Е. С. Стенд для испытания трубных резьбовых соединений при свинчивании-развинчивании в коррозионных и абразивных средах / И. Ю. Быков, Е. С. Юшин // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 8. – С. 98–99.

13. Юшин, Е. С. Методика оценки влияния пластовых вод на усталостную прочность насосно-компрессорных труб / И. Ю. Быков, Е. С. Юшин // Инженер-нефтяник. – 2014. – № 3. – С. 36–42.