

На правах рукописи



СЕЛИВАНОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

УДК 622.32:620.193

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В УСЛОВИЯХ
СКВАЖИННОЙ КОРРОЗИИ**

Специальность 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы»
(нефтегазовая отрасль)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2010

Диссертация выполнена на кафедре машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Ухтинского государственного технического университета.

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор
Быков Игорь Юрьевич.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Кучерявый Василий Иванович;

- кандидат технических наук
Бирилло Игорь Николаевич.

Ведущая организация: ООО «ПЕЧОРНИПИНЕФТЬ»

Защита состоится 29 октября 2010 года в 10-00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.291.02 при Ухтинском государственном техническом университете по адресу: 169300 Республика Коми г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ухтинского государственного технического университета.

Автореферат размещен на Интернет-сайте Ухтинского государственного технического университета www.ugtu.net в разделе «Диссертационный совет».

Автореферат разослан 27 сентября 2010 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.291.02,

кандидат технических наук, профессор



Уляшева Н. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Анализ механизмов коррозионного разрушения насосно-компрессорных труб (НКТ) в условиях высокоминерализованных пластовых жидкостей выявил зависимость этого процесса от степени минерализации и обводненности скважинной продукции, её разгазированной, дебита, содержания агрессивных компонентов, спонтанные сочетания которых по-разному влияют на скорость и характер коррозионного разрушения труб; условием прогнозирования ресурса является объективная оценка технического состояния НКТ на разных стадиях их эксплуатации для обеспечения оптимальности управления надежностью и промышленной безопасностью добычных процессов. Выяснено, что существующая номенклатура методов оценки технического состояния НКТ регламентируется ГОСТ 633 и ГОСТ Р 52203 и направлена на эффективное выявление отбраковочных дефектов методом количественного сравнения измеренных параметров с нормативными, но не включает мер промежуточного контроля свойств и структуры металла НКТ при длительном контакте их с коррозионной средой, что не позволяет оценивать запас надежности коррозионно-поврежденных труб, возможность их дальнейшей эксплуатации и вероятный остаточный ресурс в зависимости от коррозионной активности скважинных сред. Установлено, что существующие методы оценки технического состояния НКТ применительно к задаче контроля изменения свойств и структуры металла при длительном контакте с коррозионной средой требуют адаптации, развития и разработки новых методических подходов. Таким образом, совершенствование методов оценки технического состояния насосно-компрессорных труб в условиях скважинной коррозии представляет собой актуальную задачу и является целью диссертационной работы.

Цель работы.

Совершенствование оценки технического состояния насосно-компрессорных труб в условиях скважинной коррозии.

Основные задачи исследований.

- Анализ существующих методов оценки технического состояния НКТ с коррозионными повреждениями.
- Формирование комплекса методик для проведения исследований.
- Оценка текущего технического состояния насосно-компрессорных труб при сплошной коррозии их поверхности.
- Обоснование допустимых условий дальнейшей эксплуатации коррозионно-поврежденных труб с оценкой их остаточного ресурса.
- Практическая оценка технического состояния насосно-компрессорных труб в условиях скважинной коррозии.

Научная новизна.

1. Обосновано выражение для расчета объема коррозионного повреждения исследуемого элемента образца при условии, что диаметр раскрытия дефекта соответствует измеренной глубине коррозионного повреждения.
2. Получена зависимость для оценки вероятной погрешности при статистической обработке результатов измерительно-вычислительных операций

приборно-инструментального контроля.

3. Предложен критерий пригодности коррозионно-поврежденных НКТ для дальнейшей эксплуатации в виде коэффициента запаса надежности, определяемого по остаточному объему неповрежденного металла в теле трубы.

4. Найдены решения для расчета остаточного ресурса коррозионно-поврежденных труб при известных первоначальных толщинах стенок или при известной глубине коррозионного повреждения.

Основные защищаемые положения.

1. Структура системной оценки технического состояния коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб.

2. Комплекс лабораторно-исследовательских и вычислительных методик для обработки измерений.

3. Оценка текущей технической пригодности и прогнозных эксплуатационных ограничений для коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб.

4. Методы оценки остаточного ресурса коррозионно-поврежденных НКТ в разных эксплуатационных условиях.

5. Методика оценки текущего технического состояния НКТ при сплошной коррозии их поверхности.

Практическая ценность.

1. Разработаны рекомендации по совершенствованию методов оценки технического состояния коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб в виде структурной схемы поэтапных исследований с определением остаточного эксплуатационного ресурса.

2. Разработана методика лабораторного определения потери металла на коррозию.

3. Разработана методика оценки ограничительных эксплуатационных условий при дальнейшем использовании коррозионно-поврежденных НКТ по прямому назначению.

4. Разработана и утверждена в ООО «Газпром переработка» «Методика оценки коррозионного повреждения насосно-компрессорных труб в процессе эксплуатации».

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались на международных научно-технических конференциях «Севергеоэкотех» при Ухтинском государственном техническом университете в 2007-2010 годах, на научно-технических конференциях преподавателей и сотрудников УГТУ в 2007-2010 годах, а также на конференции молодых специалистов ОАО «Северные МН» в 2008 году и на конференциях в рамках научно-педагогической школы «Современные проблемы нефтепромышленной и буровой механики» в 2007-2010 годах.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 122 наименований и 7 приложений, содержит 227 страниц текста, включая 56 рисунков и 31 таблицу.

Публикации.

Основные результаты исследований опубликованы в 7 работах, в том числе 1 статья в издании, рекомендованном ВАК РФ.

Благодарности.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю: профессору, доктору технических наук Быкову Игорю Юрьевичу за неоценимую помощь и постоянный контроль на всех этапах выполнения научно-исследовательской работы.

Автор признателен ректору Ухтинского государственного технического университета, профессору, доктору технических наук Цхадая Николаю Денисовичу за создание оптимальных условий для подготовки работы.

Автор выражает благодарность профессору, доктору технических наук Ланиной Татьяне Дмитриевне за помощь в организации лабораторных исследований, начальнику отдела прочности и надежности магистральных газопроводов филиала ООО «ВНИИГаз» - «Севернипигаз» к. т. н. Ю. А. Теплинскому, а также заведующему лабораторией химико-аналитических и газопромысловых исследований филиала ООО «ВНИИГаз» - «Севернипигаз» А. И. Бурмантову за помощь при проведении лабораторных испытаний.

Автор благодарен сотрудникам кафедры машин и оборудования нефтяной и газовой промышленности Ухтинского государственного технического университета доценту Е. М. Москалевой, к. т. н., доценту Т. В. Бобылевой, к. т. н., доценту В. В. Соловьеву и ст. преподавателю О. А. Батмановой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы.

В первой главе произведен анализ существующих методов оценки технического состояния НКТ с коррозионными повреждениями, а также рассмотрены теоретические и практические вопросы разрушения насосно-компрессорных труб под действием коррозии. Представлены методы определения скорости коррозии и методы оценки работоспособности трубных изделий промышленного назначения. Сформулированы цель и задачи исследования.

Среди работ, выполненных в этом направлении следует отметить исследования ученых, таких как И. Н. Бирилло, И. Ю. Быков, Б. Э. Гопкинс, А. П. Ефремов, А. П. Жуков, О. Кубашевский, Т. Д. Ланина, А. И. Малахов, Р. У. Ревы, Л. С. Саакян, В. В. Скорчелетти, И. А. Соболева, И. Я. Сокол, Ю. А. Теплинский, Н. Д. Томашов, Г. Г. Улиг, Е. А. Ульянин, Э. Г. Фельдгандлер, Г. П. Чернова, Ю. Р. Эванс и других.

На основе проведенного анализа литературных источников показано, что по действующим нормам техническому контролю подвергаются как новые, так и бывшие в эксплуатации трубы.

В соответствии с ГОСТ 633 – 80 и ГОСТ Р 52203 – 2004 этот процесс включает в себя следующие операции: визуальный контроль; инструментальный контроль линейных размеров НКТ; контроль качества резьбы труб и муфт; дефектоскопию и толщинометрию; шаблонирование; гидравлические испыта-

ния насосно-компрессорных труб; покрытие поверхности труб; маркировку труб; комплектование.

Однако номенклатура оценочного комплекса не содержит этапа оценки изменений в условиях длительного контакта металла НКТ со скважинной коррозионной средой. Между тем, это влияние весьма существенно: изменяется площадь поперечного сечения, и возникают остаточные концентраторы напряжений из-за коррозионного разрушения поверхности НКТ, а также изменяются прочностные свойства стали в результате электрохимических процессов на контакте с коррозионной средой. Эти изменения сопровождаются уменьшением несущей способности труб и сокращением эксплуатационного ресурса. Дать оценку этим изменениям в текущем и обозримом времени существующий оценочный комплекс не в состоянии без дополнения его этапом контроля прочностных и деформационных изменений структуры металла в коррозионной среде.

Методологически такой оценочный этап должен содержать необходимый и достаточный набор измерительно-контрольных процедур, обеспечивающих научно обоснованную оценку:

- текущего технического состояния коррозионно-поврежденных НКТ, заключающуюся в отборе контрольных образцов, их визуальном обследовании и приборно-инструментальных измерениях: твердометрии; толщинометрии; коррозионных потерь металла; эти сведения являются исходными данными для последующих оценок и расчетных прогнозов;

- возможности дальнейшей эксплуатации насосно-компрессорных труб, включающую исследования металлографических и прочностных изменений металла под действием коррозионных сред для сравнения с допускаемыми нормативными значениями;

- коррозионной совместимости металла труб и скважинных сред для расчетного определения допустимой глубины спуска НКТ в различных скважинных средах;

- остаточного эксплуатационного ресурса коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб по скорости их коррозии в контактной скважинной среде с последующим расчетом вероятного времени наступления предельного состояния.

Предложенная структура контрольно-измерительных процедур представляет собой алгоритм совершенствования методов оценки технического состояния насосно-компрессорных труб в условиях скважинной коррозии. В схематической форме структура этой методики представлена на рисунке 1.

Вторая глава посвящена обоснованию научно-методического комплекса, обеспечивающего совершенствование методов оценки технического состояния НКТ в условиях скважинной коррозии, комплекс включает: методику визуально-оптического и измерительного контроля для выявления идентификационных и отбраковочных признаков; методику коррозионных испытаний потенциометрическим, гравиметрическим и электрохимическим способами для измерения мгновенной, истинной и условной скоростей коррозии металла в минерализованных средах; методику неразрушающего контроля для исследования механических свойств металла, подвергнутого коррозии и измерения толщины сте-

нок труб; методику металлографических исследований для выявления типа, формы и размеров коррозионных дефектов в структуре коррозионно-поврежденной стали; методику статистической обработки результатов исследований для обеспечения математической корректности их обработки и достоверности вычислений.

В третьей главе разработана методика оценки текущего технического состояния насосно-компрессорных труб при сплошной коррозии их поверхности. Методика предназначена для выявления степени коррозионного повреждения НКТ и пригодности их к последующей эксплуатации. Оценка выполняется лабораторным методом в два этапа.

На этапе визуально-оптического и измерительного контроля образцов регламентирован порядок их отбора для исследований, идентификация и обмер, последовательность визуального осмотра и оптического изучения с целью выявления явных отбраковочных признаков. Обоснование потребной длины образца и схема его разделки на испытательные фрагменты представлены на рисунке 2.

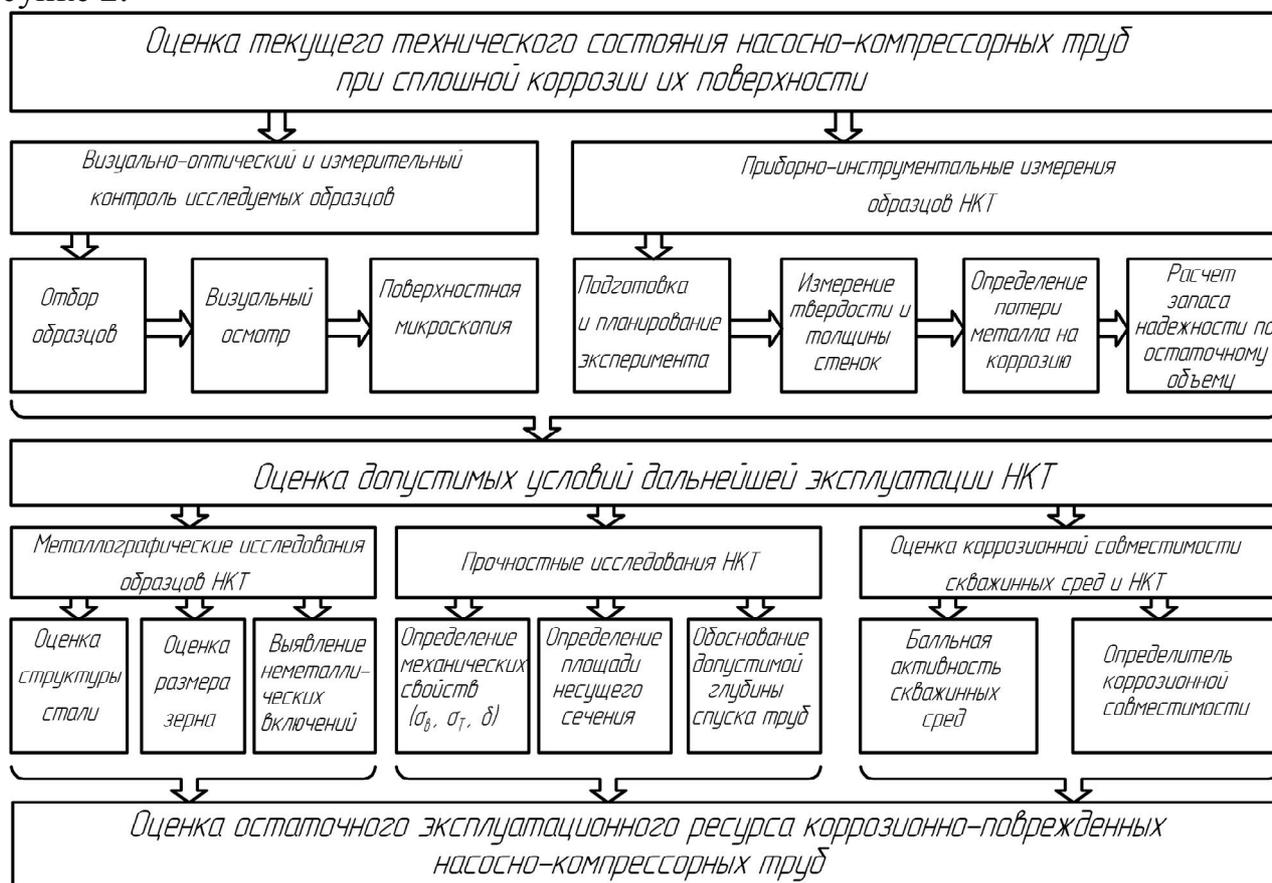
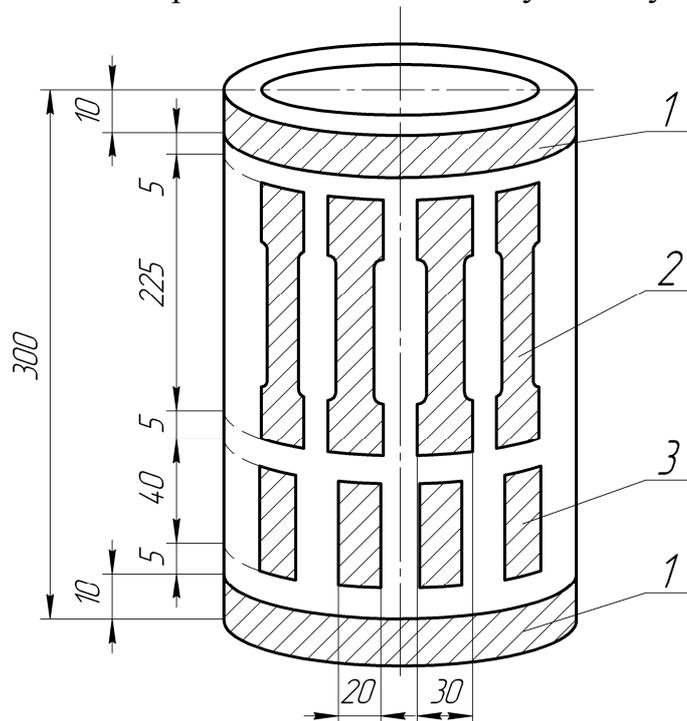


Рисунок 1 – Схема поэтапной оценки технического состояния насосно-компрессорных труб в условиях скважинной коррозии

При отсутствии явных отбраковочных признаков образец подвергается приборно-инструментальному контролю, который включает подготовку поверхности к испытаниям по ГОСТ 9450, ГОСТ 1778, ГОСТ 9.905, ГОСТ 1497 и др., планирование эксперимента включающего определение реперезентативно-

го числа измерений, проверку полученной выборки на наличие грубых ошибок, совместимость наблюдений и нормальность распределения; проведение измерений твердости и толщины стенок, определение потери металла на коррозию и расчет запаса надежности образцов по остаточному объему металла.



1 – кольцевые фрагменты (верхний и нижний) для определения коррозионных повреждений;
2 – контуры плоских фрагментов для испытания на растяжение; 3 – контуры пластин для коррозионных и металлографических исследований

Рисунок 2 – Обоснование потребной длины исследуемого образца

Определение репрезентативного числа измерений для нормального закона распределения позаимствовано из работы М. А. Гусейн-Заде:

$$N = \frac{z_{\gamma}^2}{4 \cdot \Delta P_{\max}} - z_{\gamma}^2, \quad (1)$$

где z_{γ} – табулированное критическое значение квантиля нормального распределения ΔP_{\max} – абсолютная допустимая погрешность, %.

Для других вероятных распределений получены следующие выражения:

- при распределении Вейбулла задаются тремя параметрами: относительной погрешностью $\delta_{от}$, доверительной вероятностью γ и коэффициентом $m_0=f(v_{вар})$, где $v_{вар}$ коэффициент вариации, и рассчитывают число репрезентативных измерений:

$$N = \frac{r_1 \cdot \chi_{1-\alpha}^2(r)}{2}, \quad (2)$$

где $r_1=(1+\delta_{от})^{m_0}$ – первое характеристическое число; $\chi_{1-\alpha}^2(r)$ – табулированное значение квантиля «хи-квадрат», которое отыскивается методом подбора при $r=2N$;

- при экспоненциальном распределении задаются уровнем доверительности γ , относительной погрешности $\delta_{от}$ и предельной вероятностью отказа q ; ре-

презентативное число измерений определяется из выражения

$$N = \frac{n}{q \cdot r_3}, \quad (3)$$

где n – число допустимых отказов, определяемых методом подбора из равенства:

а) для невосстанавливаемой системы

$$n = \frac{\chi_\alpha^2(r)}{2 \cdot (1 + \delta)}, \quad (4)$$

б) для восстанавливаемой системы

$$n = \frac{(1 + \delta) \cdot \chi_\alpha^2(r)}{2}, \quad (5)$$

r_3 – третье характеристическое число, равное

$$r_3 = \frac{2 \cdot n!}{\chi_\alpha^2(r)}. \quad (6)$$

В выражениях (4), (5), (6) значение степени свободы составляет $\nu = 2n + 2$.

После определения числа репрезентативных измерений N поверхность образца размечается равномерной сеткой с числом пересечений не менее N и проводятся измерения твердости и толщины стенок образца. После статистической обработки полученных данных выполняется оценка статистической погрешности измерительно-вычислительных операций по формуле

$$\Delta_\Sigma = \left[(\Delta_{\text{п}} + 0,01 \cdot P_{\text{оц}}) + \bar{S} \right] \cdot t_{1-\alpha}(r) \cdot N_{\text{в}}^{-0,5}, \quad (7)$$

где $\Delta_{\text{п}}$ – ошибка прибора; $P_{\text{оц}}$ – оцениваемый параметр; \bar{S} – среднеквадратическое отклонение выборки; $t_{1-\alpha}(r)$ – квантиль Стьюдента; α – уровень значимости; r – степень свободы; $N_{\text{в}}$ – число измерений.

Разработана методика лабораторного определения потери металла на коррозию. В основу методики положен принцип прямого измерения глубины $h_{\text{к}}$ коррозионного повреждения случайно выбранных элементов образца площадью $F=10$ мм x 10 мм. Таких площадок по кольцу образца выбирается три (рисунок 3) со сдвигом относительно друг друга на $2,094$ рад.

Для прямого измерения глубины коррозионного повреждения разработана и изготовлена микрометрическая установка ММУ-1 (рисунок 4).

Установка предназначена для зондирования конфигурации дна коррозионного повреждения, формирующегося случайно из углублений правильной и неправильной форм, расположение которых и взаимное слияние непредсказуемы. В качестве измерительного узла используется неподвижный индикатор 6 часового типа (ИЧ-25 по ГОСТ 577-68, 1-й класс точности, погрешность измерения $\pm 0,032$ мм) с игольчатым щупом 9, относительно которого с помощью винта 10 перемещается по осевой образующей исследуемая площадка 5 ($F=10$ мм x 10 мм).

Результаты измерений обрабатываются в программе Microsoft Excel с построением профилеграмм (рисунок 5) по каждой строке ячеек.

На основании профилеграмм составляется виртуальная матрица со сред-

неарифметическими значениями глубин коррозионного повреждения $h_{кор}$ каждой из 100 ячеек разметочной сетки. Объем коррозионного повреждения ячейки $V_{яч}$ определяется из представления о слиянии объемов единичных дефектов $N_{ед}$ (рисунок 6), размещающихся в коррозионном объеме ячейки:

$$V_{яч} = V_{ед} \cdot n_{ед} \cdot C_n, \quad (7)$$

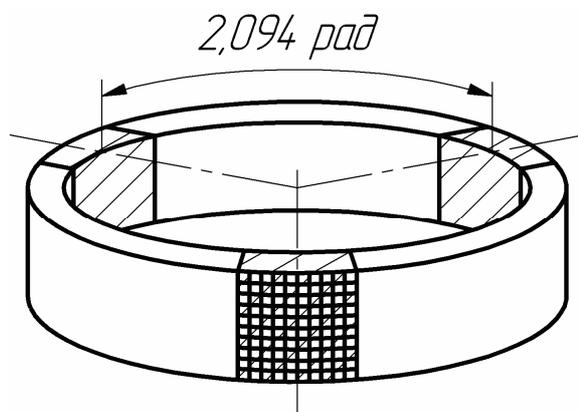
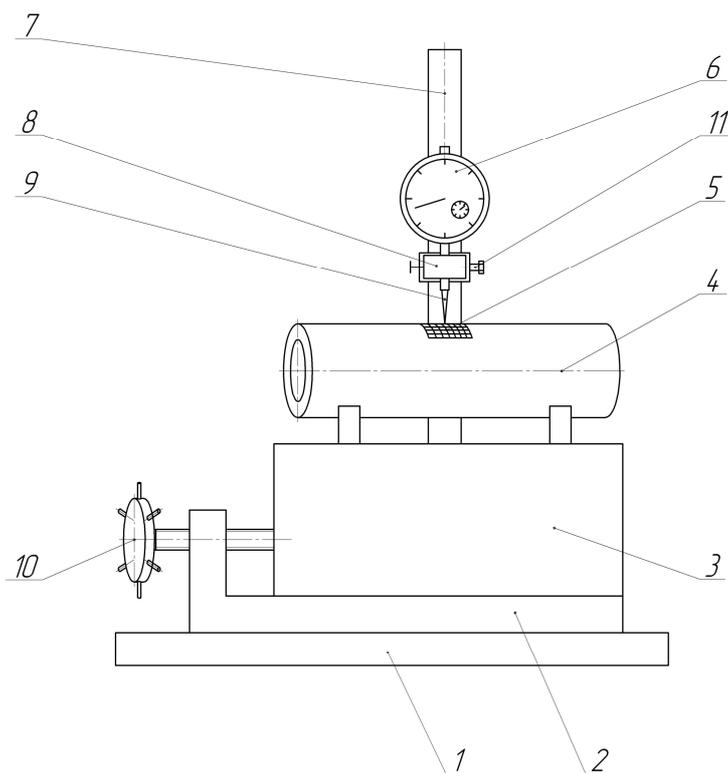


Рисунок 3 - Схема выбора участков для измерения глубины коррозионного повреждения поверхности образцов насосно-компрессорных труб



1 – основание; 2 – направляющие; 3 – установочная призма; 4 – образец; 5 – участок измерений; 6 – индикатор часового типа; 7 – стойка; 8 – зажим; 9 – игольчатый щуп; 10 – винт регулировочный; 11 – стопор

Рисунок 4 – Установка ММУ – 1 для измерения профиля поверхности коррозионного повреждения

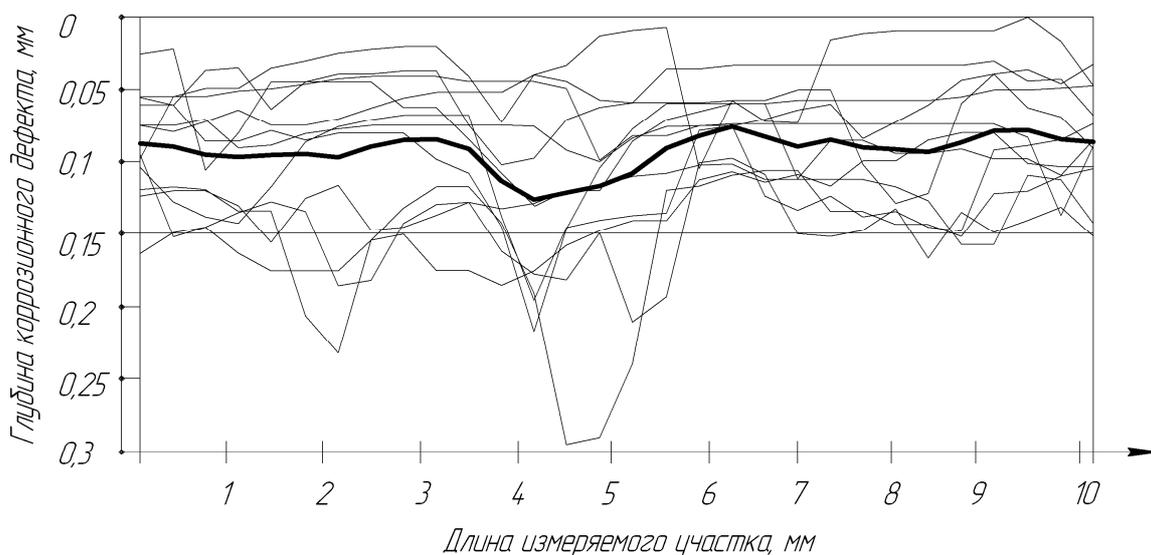
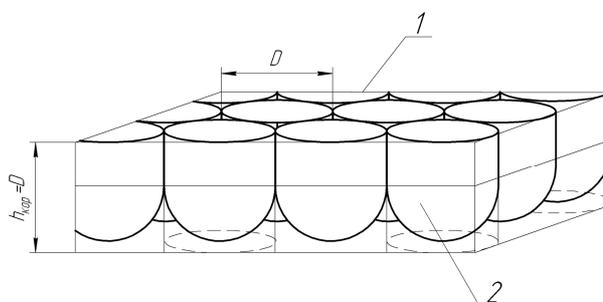


Рисунок 5 – Пример построения профилегграмм зондирования конфигурации коррозионного повреждения на площадке измерений $F=10\text{мм} \times 10\text{мм}$



1 – объем единичного разрушения; 2 – объем единичного дефекта
Рисунок 6 – Понятие об объеме коррозионного повреждения

где $V_{\text{ед}}$ – объем единичного дефекта, под которым понимается коррозионное углубление относительно правильной формы с диаметром устьевого раскрытия, равным его глубине $D_{\text{ед}}=h_{\text{кор}}$ (рисунок 7), определяемый из обобщенного вычисления

$$V_{\text{ед}} = k_{\text{ф}} \cdot \lambda_{\text{н}} \cdot D_{\text{ед}}^3, \quad (8)$$

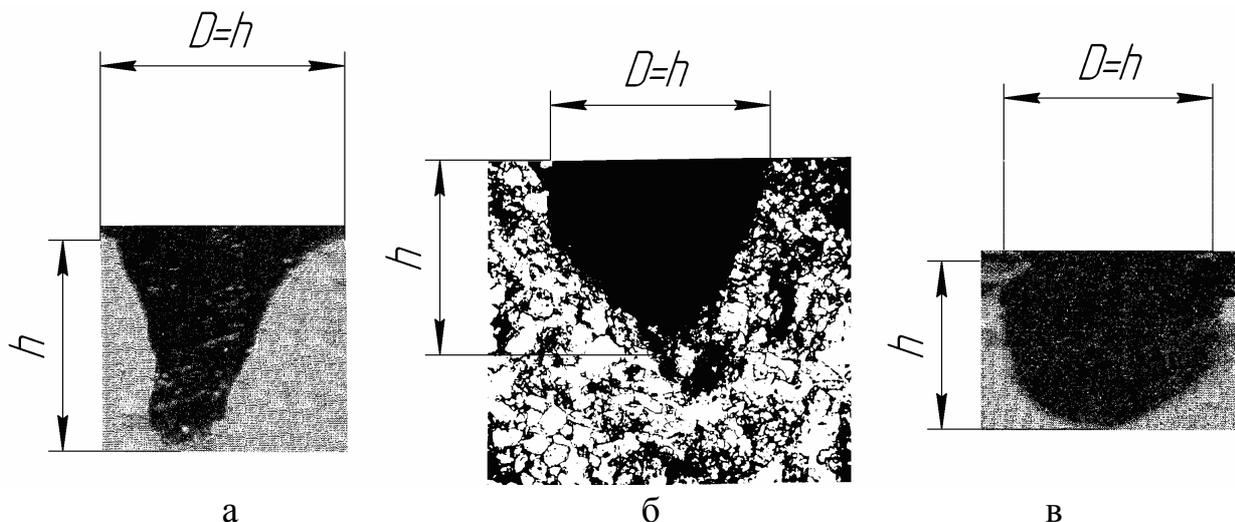
здесь $k_{\text{ф}}$ – коэффициент, учитывающий форму единичного дефекта (цилиндро-сферический; параболоидный, цилиндрико-параболоидный); $\lambda_{\text{н}}$ – поправка на неучтенный объем;

$$n_{\text{ед}} = 1,1422 \cdot D_{\text{ед}}^{-2,0049}, \quad (9)$$

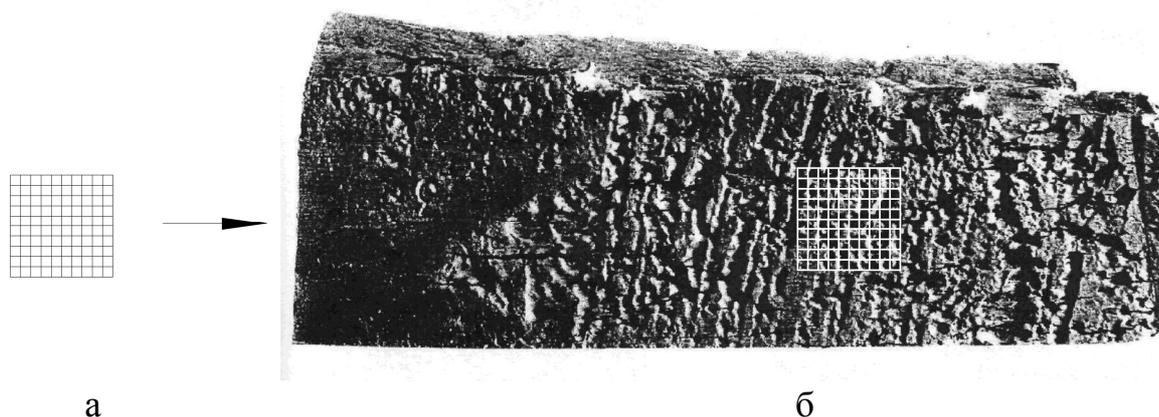
$C_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий часть единичных объемов, фактически попавших в зону коррозионного углубления; коэффициент определяется визуально по методике проф. Г. Е. Панова (1972 г.) с помощью трансфокирования (увеличения) цифрового фотоизображения обследуемой площадки и оценкой доли её фотозатемнения. Пример фотоизображения коррозионно-поврежденного участка трубы с нанесенной сеткой представлен на рисунке 8.

Коррозионное повреждение на увеличенном изображении и общем светлом фоне выделяется как темное пятно или затемненное поле с вполне очерченными границами. По линии этой границы и определяется площадь затемне-

ния квадратной ячейки размером 1 x 1 мм методом визуальной оценки трансфокусированного изображения в долевого или процентном отношении к площади самого квадрата.



а – питтинговый; б – язвенный; в – формирующееся пятно коррозии
Рисунок 7 – Металлографические изображения единичных дефектов



а – координатная сетка величиной 10 x 10 мм с шагом 1 мм; б – образец в программе «КОМПАС» с совмещенной сеткой

Рисунок 8 – Пример фотоизображения образца с нанесенной сеткой

Показано также, что наибольшее вероятное значение $V_F^{вер}$ коррозионного повреждения определяется как сумма среднестатистических измерений $\bar{V}_F = \sum V_{F_i} / n$ при числе исследованных площадок n , и поправки Δ_Σ на измерительно-статистическую погрешность:

$$V_F^{вер} = \bar{V}_F + \Delta_\Sigma, \quad (10)$$

Оценку пригодности исследованных коррозионно-поврежденных НКТ для дальнейшей эксплуатации предложено выполнять расчетом запаса надежности по остаточному объему:

$$K_H = \frac{V_{пер} - \bar{V}_F}{V_{доп}} \geq 1, \quad (11)$$

где $V_{пер}$ – первоначальный объем исследуемого элемента

$$V_{\text{пер}} = \frac{\rho_{\text{дуг(нар)}} \cdot (D_{\text{нар}}^2 - D_{\text{вн}}^2) \cdot z}{3,955 \cdot D_{\text{нар}}} \quad (12)$$

здесь: $\rho_{\text{дуг(нар)}}$ – длина дуги по наружной стенке элемента; $D_{\text{нар}}$, $D_{\text{вн}}$ – наружный и внутренний диаметры НКТ; z – высота элемента;

$V_{\text{доп}}$ – допустимый объем неповрежденного металла, при котором тело трубы сохраняет несущую способность:

$$V_{\text{доп}} = \frac{0,19 \cdot \rho_{\text{дуг(нар)}} \cdot \delta_{\text{ст}} \cdot (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) \cdot z}{D_{\text{нар}}} \quad (13)$$

здесь $\delta_{\text{ст}}$ – номинальная или измеренная толщина стенки образца.

При соблюдении условия (11) $K_n \geq 1$ коррозионно-поврежденные НКТ пригодны для дальнейшего использования по прямому назначению с уточнением ограничений по эксплуатационным условиям.

При $K_n < 1$ НКТ к дальнейшей эксплуатации не допускаются.

Четвертая глава содержит обоснование возможности дальнейшей эксплуатации коррозионно-поврежденных НКТ.

Это обоснование базируется на всестороннем исследовании образцов изучаемых НКТ, которое включает металлографическую оценку структуры стали её дефектность и загрязнённость неметаллическими включениями, оценку механических свойств исследуемого металла, оценку коррозионной совместимости НКТ со скважинными средами и оценку остаточного эксплуатационного ресурса коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб.

Металлографические исследования (ГОСТ 5639-82, ГОСТ 1778-70) позволяют выявить влияние ионного объема в солевой среде на изменение структуры металла, его зерновой состав, наличие расслаиваний и пустот подповерхностной коррозии, уровень загрязненности в сравнении с эталонно-нормативными значениями для этого типа сталей.

Прочностные исследования образцов (ГОСТ 1497, ГОСТ 9012, ГОСТ 14782 и др.) предназначены для выявления отклонений параметров прочности (σ_b , σ_t , δ) сталей под воздействием эксплуатационных факторов в условиях скважины и скважинных минерализованных жидкостей. Уменьшение показателей прочности по сравнению с нормативными значениями является основанием для уточнения допустимых условий для дальнейшей эксплуатации коррозионно-поврежденных НКТ. Уточнение касается определения ограничительной глубины их спуска в скважину на основе фактически измеренных параметров прочности металла и фактической площади несущего сечения трубы.

Фактическая площадь несущего сечения коррозионно-поврежденных труб определяется из известного выражения с учетом уменьшения наружного $D_{\text{нар}}$ и внутреннего $D_{\text{вн}}$ диаметров за счет коррозии:

$$F_{\phi} = 0,785 \cdot \left[(D_{\text{н}} - 2 \cdot h_{\text{кор(н)}})^2 - (D_{\text{вн}} + 2 \cdot h_{\text{кор(вн)}})^2 \right] \quad (14)$$

где $h_{\text{кор(н)}}$, $h_{\text{кор(вн)}}$ – глубина коррозионного повреждения стенок трубы: (н) – наружной; (вн) – внутренней.

Глубина коррозионного повреждения $h_{\text{кор}}$ стенки трубы определяется как

средневзвешенная величина из выражения

$$h_{\text{кор}} = \frac{3,955 \cdot V_F^{\text{вер}} \cdot D_{\text{нар}}}{\rho_{\text{дуг(нар)}} \cdot (D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}) \cdot z}. \quad (15)$$

где $V_F^{\text{вер}}$ – вероятное наибольшее значение объема коррозионного повреждения обследованных труб.

Полученное значение F_{ϕ} целесообразно сравнить с критической площадью $F_{\text{кр}}$ сечения трубы, при достижении которой она считается непригодной для последующего использования. В соответствии с требованиями допустимое утончение δ_d стенки трубы не должно превышать 25% или

$$\delta_d = 0,25 \cdot \delta_{\text{ст}}.$$

Тогда по аналогии с (14) критическая площадь сечения НКТ составит:

$$F_{\text{кр}} = 0,785 \cdot \left[\left(D_{\text{н}} - \frac{0,25 \cdot \delta_{\text{ст}}}{2} \right)^2 - \left(D_{\text{вн}} + \frac{0,25 \cdot \delta_{\text{ст}}}{2} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Отношение F_{ϕ} к $F_{\text{кр}}$ представляет собой запас надежности коррозионно-поврежденных НКТ по несущему сечению, при этом должно выполняться условие

$$K_{\text{н}} = \frac{F_{\phi}}{F_{\text{кр}}} \geq 1. \quad (17)$$

При выполнении условия (17) проводят расчет допустимой глубины спуска труб в соответствии с рекомендациями АНИ и с учетом факторов коррозии, влияющих на изменение структурных и прочностных свойств металла труб.

Значение допустимой глубины спуска коррозионно-поврежденных НКТ принимается наименьшим из расчетных результатов, полученных по:

- напряжениям в теле трубы

$$L_{\text{т}} = \frac{0,95 \cdot \sigma_{\text{вmin}}}{k_{\text{м}} \cdot K_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot g}; \quad (18)$$

- усилию вырыва резьбы в муфтовом соединении

$$L_{\text{в}} = \frac{0,95 \cdot F_{\text{р}} \cdot L_{\text{р}}}{k_{\text{м}} \cdot K_{\text{см}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot g} \cdot \left(\frac{4,988 \cdot D_{\text{н}}^{-0,59} \cdot \sigma_{\text{вmin}}}{0,5 \cdot L_{\text{р}} + 0,14 \cdot D_{\text{н}}} + \frac{\sigma_{\text{тmin}}}{L_{\text{р}} + 0,14 \cdot D_{\text{н}}} \right), \quad (19)$$

- усилию разрыва трубы в сечении последнего полного витка резьбы

$$L_{\text{р}} = \frac{0,95 \cdot F_{\text{р}} \cdot \sigma_{\text{вmin}}}{k_{\text{м}} \cdot K_{\text{р}} \cdot F_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot g}. \quad (20)$$

В формулах (18)...(20) использованы следующие условные обозначения: $\sigma_{\text{вmin}}$, $\sigma_{\text{тmin}}$ – минимальные значения пределов прочности и текучести соответственно; $k_{\text{м}}$ – коэффициент утяжеления трубы за счет муфты; $K_{\text{св}}$, $K_{\text{см}}$, $K_{\text{р}}$ – коэффициенты запаса на статическую прочность, смятие и растягивающую нагрузку соответственно; $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стали; g – ускорение силы тяжести; $F_{\text{тр}}$, $F_{\text{р}}$ – площади несущего сечения в теле трубы и под последним полным витком резьбы соответственно; $L_{\text{р}}$ – длина резьбы, находящаяся в зацеплении.

Разработана методика оценки коррозионной совместимости трубных сталей и скважинных минерализованных сред. Методика является по существу инструментом управления остаточным эксплуатационным ресурсом коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб. При этом очевидно, что скорость коррозионного разрушения НКТ в минерализованной скважинной среде зависит от её коррозионной активности. Уровень этой активности предлагается оценивать 10-ти балльной шкалой по условной скорости коррозии, измеряемой с помощью прибора «Монитор – 2», датчик которого оттарирован по стали Ст. 20. При этом каждому оценочному баллу соответствует некоторый диапазон объективно измеряемых скоростей коррозионного разрушения.

По аналогии с ГОСТ 13819-68, предлагается коррозионную активность скважинных сред ранжировать на баллы от 1 до 10 и подразделить на 6 классов. Предлагаемая шкала ранжирования представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Шкала коррозионной активности минерализованных сред

Группа коррозионной активности	Условная скорость коррозии v , мм/год	Балл коррозионной активности	Группа коррозионной активности	Условная скорость коррозии v , мм/год	Балл коррозионной активности
Неагрессивная (НА)	<0,001	1	Агрессивная (АС)	>0,1...0,5	6
				>0,5...1,0	7
Мало агрессивная (МА)	>0,001...0,005	2	Весьма агрессивная (ВА)	>1,0...5,0	8
	>0,005...0,01	3		>5,0...10	9
Пониженно-агрессивная (ПА)	>0,01...0,05	4	Совершенно агрессивная (СА)	>10	10
	>0,05...0,1	5			

Для примера выполнена оценка коррозионной активности скважинных сред основных нефтегазодобывающих регионов Тимано-Печорской нефтегазодобывающей провинции (ТПНГП). Результаты этих исследований приведены в таблице 2.

По результатам исследований построена зависимость изменения условной скорости коррозии от минерализации скважинных сред (рисунок 9) при этом значение точки [* (0,02; 110)] заимствовано из методических рекомендаций (МР 1967-2007) «Севернипгаза». С учетом этой дополнительной точки зависимость $v=f(C)$ аппроксимируется полиномом пятой степени с достоверностью аппроксимации $R^2 \approx 1$

$$v=2 \cdot 10^{-11} \cdot C^5 - 2 \cdot 10^{-8} \cdot C^4 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot C^3 - 0,0009 \cdot C^2 + 0,0486 \cdot C - 0,81 \text{ мм/год}, \quad (21)$$

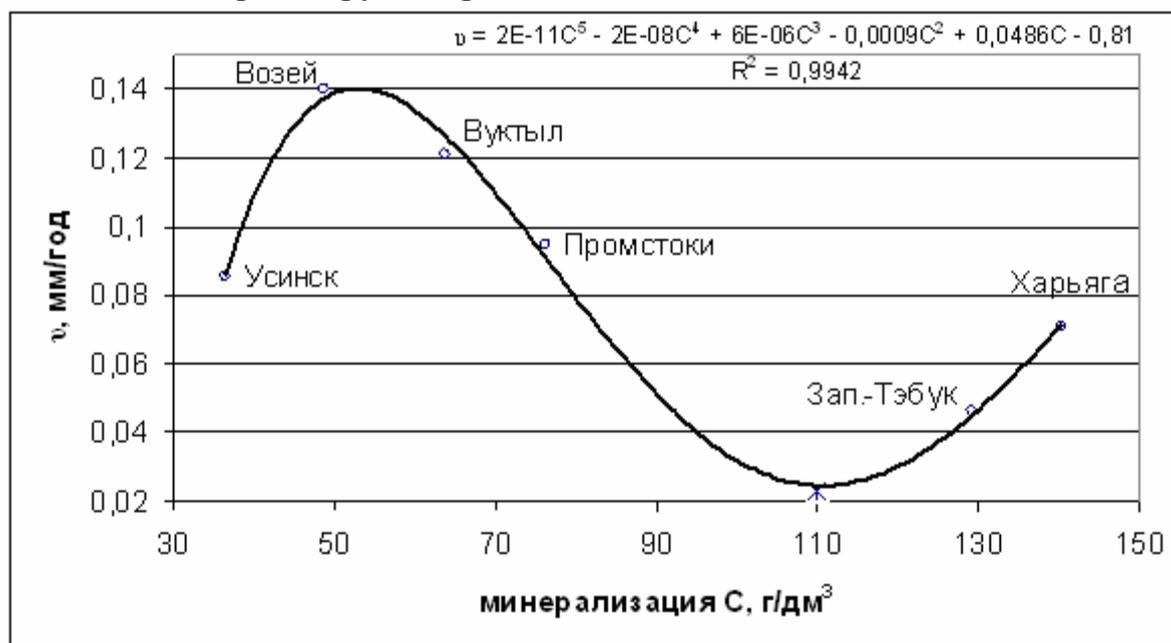
Таблица 2 – Результаты исследований коррозионной активности скважинных сред некоторых месторождений ТПНГП

Место отбора проб минерализованных сред	рН	Минерализация C , г/дм ³	Условная скорость коррозии v , мм/год
Западно-Тэбукское нефтяное месторождение	6,3	129,2	0,0462
Харьгинское нефтяное месторождение	5,5	140,3	0,071
Усинское нефтяное месторождение	5,0	36,4	0,0856
Возейское нефтяное месторождение	<4	48,7	0,1402
Вуктыльское газоконденсатное месторождение	4,3	63,6	0,1212
Промысловые стоки (УКПГ СП-3 Вуктыл)	4,7	76,3	0,0946

где C – минерализация исследованных сред, выражаемая в г/дм³.

Таким образом, выражение (21) позволяет оперативно прогнозировать значение условной скорости коррозии по солесодержанию минерализованных сред и классифицировать их по уровню коррозионной активности в соответствии со шкалой, приведенной в таблице 1.

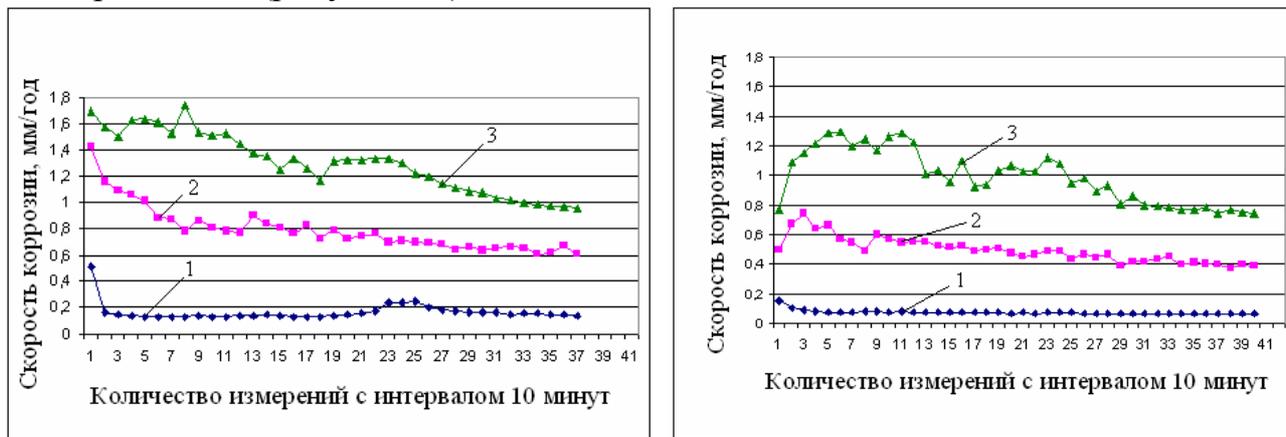
Анализ полученной зависимости (см. рисунок 9) показывает, что она имеет нелинейный характер, причем вектор скорости на разных участках меняет знак. Такой характер вполне соответствует известной аналогичной зависимости применительно к раствору поваренной соли.



○ – измеренные значения, мм/год; * – заимствованное значение, мм/год

Рисунок 9 – Изменение условной скорости коррозии в функции минерализации скважинных коррозионных сред

Определяли также влияние динамики перемешивания минерализованной среды на изменение скорости коррозии. Результаты исследований приведены для примера на пристоках и пластовой воде Вуктыльского газоконденсатного месторождения (рисунок 10).



а

б

а – пристоки; б – пластовая вода;

1 – в статике; 2 – скорость перемешивания 0,19 м/с; 3 – скорость перемешивания 0,24 м/с

Рисунок 10 – Изменение условной скорости коррозии в зависимости от динамики перемешивания минерализованной среды (на примере Вуктыльского газоконденсатного месторождения)

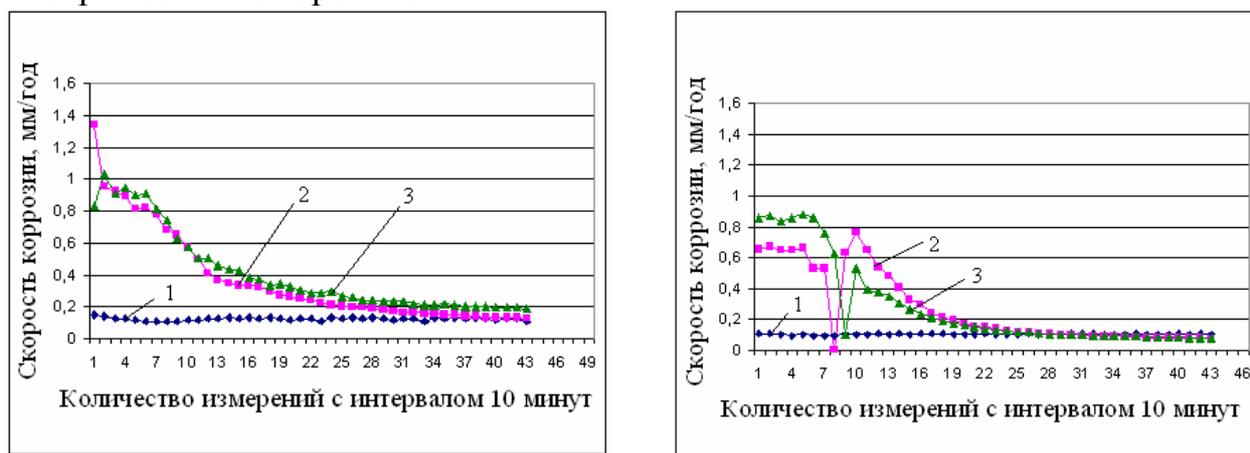
Как видно, при повышении скорости перемешивания минерализованной среды с 0 до 0,19 и 0,24 м/с условная скорость коррозии повышается в 4-6 и 8-12 раз соответственно по сравнению с неподмешиваемой средой.

Такое поведение систем объяснено динамическим воздействием на окисную пленку и кислородонасыщенностью исследуемых сред, уровень которой в естественных условиях при контакте с кислородом воздуха составляет 6-8 мг/дм³, а при перемешивании достигает 10-12 мг/дм³ и более. В условиях скважины, как известно, кислородонасыщенность пластовых жидкостей практически отсутствует и, следовательно, характер коррозионного разрушения металла должен быть иным. Для уточнения этой особенности выполнили исследование скорости коррозии в модельных минерализованных средах, подвергнутых обескислороживанию путём прокачки гелия. Результаты этих исследований представлены на рисунке 11.

Как видно, условная скорость коррозии в статике вполне сопоставима для всех исследованных кислородосодержащих и обескислороженных жидкостей. Это важный практический вывод. Далее установлено, что в условиях динамики (0,19 м/с; 0,24 м/с) характер изменения условной скорости коррозии в обескислороженной среде принципиально отличается от этого процесса в среде, насыщенной кислородом. В частности, эффект возрастания условной скорости коррозии проявляется здесь кратковременно (в экспериментах не более 220 минут), практически не зависит от скорости перемешивания, стабилизируясь в дальнейшем на уровне скоростей коррозии в статических условиях.

Таким образом, появляется возможность различать условия использования НКТ в скважинах или наземных сооружениях (например, манифольд), в

статических или динамических условиях. Показано, что в зависимости от указанных режимов состояния минерализованных сред балльная оценка их коррозионной активности может изменяться, что наглядно демонстрируется в таблице 3. Оценка коррозионной активности минерализованных сред по предложенной балльной шкале важна на стадии принятия решения о коррозионной совместимости этих сред и сталей НКТ. При этом балльный ранг коррозионной стойкости для трубной стали назначается по истинной скорости её коррозии, определяемой экспериментально по методике потенциометрических или гравиметрических измерений.



а

б

а – модель пристоков; б – модель пластовых вод; 1 – в статических условиях; 2 – при скорости перемешивания 0,19 м/с; 3 – при скорости перемешивания 0,24 м/с

Рисунок 11 – Характер изменения эталонной скорости коррозии в модельных средах (на примере Вуктыльского газоконденсатного месторождения)

Методика оценки остаточного ресурса коррозионно-поврежденных НКТ рассматривает три подхода:

а) метод вероятностного расчета остаточного ресурса на основе статистических измерений первоначальной толщины стенок труб; в этом случае значение остаточного ресурса определяется как разность

$$R_{\text{ост}} = t - t_{\text{к}}. \quad (22)$$

где t – расчетное время безотказной работы нового изделия

$$t = \frac{t_{\text{к}} \cdot \sqrt{1 - [1 - q(\tau)]^2}}{\sqrt{1 - [1 - q(\tau_n)]^2}}. \quad (23)$$

при условии, что $q(\tau)$ – вероятность отказа в момент времени τ , при котором максимальное из измеренных толщин стенок δ_{imax} уменьшится до допустимого значения $\delta_{\text{доп}}$ при выполнении условия

$$q(\tau) = \frac{\delta_{\text{imax}} - \delta_{\text{доп}}}{\delta_{\text{imax}}}, \quad (24)$$

а $q(\tau_n)$ – вероятность отказа в момент времени τ_n , при котором происходит полное разрушение образца и выполняется условие

$$q(\tau_n) = \frac{\delta_{i\max} - \delta_{i\min}}{\delta_{i\max}}, \quad (25)$$

причём $\delta_{i\min}$ – минимальное из измеренных значений толщин стенок в статистической выборке;

t_k – время, в течение которого труба подвергалась коррозии.

Таблица 3 - Обобщенные результаты исследований условной скорости коррозии в природных и модельных минерализованных средах основных нефтегазовых месторождений Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции

№	Место отбора проб	Скорость коррозии по прибору «Монитор-2»V, мм/год					
		Статика $v=0$	Динамика (2 режим) $v=0,19$ м/с	Динамика (3 режим) $v=0,24$ м/с	Статика, $v=0$	Динамика (2 режим) $v=0,19$ м/с	Динамика (3 режим) $v=0,24$ м/с
		модельный раствор (в условиях скважины)			проба пластовой воды (в условиях поверхности)		
1	Вуктыльское газоконденсатное месторождение	$\frac{0,1212}{6}$	$\frac{0,077}{5}$	$\frac{0,1368}{6}$	$\frac{0,1372}{6}$	$\frac{0,6324}{7}$	$\frac{0,974}{7}$
2	Промстоки (насосная УКПГ СП-3 Вуктыл)	$\frac{0,0946}{5}$	$\frac{0,1308}{6}$	$\frac{0,0784}{5}$	$\frac{0,063}{5}$	$\frac{0,377}{6}$	$\frac{0,763}{7}$
3	Западно-Тэбукское нефтяное месторождение	$\frac{0,0462}{4}$	$\frac{0,0524}{5}$	$\frac{0,0524}{5}$	$\frac{0,0523}{5}$	$\frac{0,317}{6}$	$\frac{0,655}{7}$
4	Возейское нефтяное месторождение	$\frac{0,1402}{6}$	$\frac{0,1396}{6}$	$\frac{0,1446}{6}$	$\frac{0,1634}{6}$	$\frac{0,854}{7}$	$\frac{1,245}{8}$
5	Харьягинское нефтяное месторождение	$\frac{0,071}{5}$	$\frac{0,073}{5}$	$\frac{0,0742}{5}$	$\frac{0,084}{5}$	$\frac{0,545}{7}$	$\frac{0,952}{7}$
6	Усинское нефтяное месторождение	$\frac{0,0856}{5}$	$\frac{0,0844}{5}$	$\frac{0,0928}{5}$	$\frac{0,0915}{5}$	$\frac{0,631}{7}$	$\frac{0,989}{7}$

Примечание – в числителе: значение условной скорости коррозии v , мм/год; в знаменателе: оценочный балл коррозионной активности исследованной минерализованной среды.

Подставив (23) в (22), получаем окончательное выражение для прогноз-ного расчета остаточного ресурса коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб:

$$R_{\text{ост}} = t_{\text{к}} \cdot \left(\frac{\sqrt{1 - [1 - q(\tau)]^2}}{\sqrt{1 - [1 - q(\tau_n)]^2}} - 1 \right). \quad (26)$$

б) расчет остаточного ресурса $R_{\text{ост}}$ на основе измерения глубины $h_{\text{к}}$ кор-розионного повреждения поверхности труб; в этом случае значение остаточно-го ресурса определяется из формулы

$$R_{\text{ост}} = \frac{h_{\text{ост}}}{v_{\text{кор}}}, \quad (27)$$

где $h_{\text{ост}}$ – толщина остаточного слоя металла допустимого к утончению стенки трубы

$$h_{\text{ост}} = \frac{0,875 \cdot \delta_{\text{н}} - \delta_{\text{доп}} - 2 \cdot h_{\text{к}}}{2}, \quad (28)$$

$0,875 \cdot \delta_{\text{н}}$ – вероятная минимальная толщина стенки ($0,875$ – коэффициент, учи-тывающий стандартное предельное отклонение на толщину стенки, равное - $12,5\%$); $\delta_{\text{н}}$ – номинальная толщина стенки; $\delta_{\text{доп}} = 0,75 \cdot \delta_{\text{н}}$ – допустимая толщина стенки трубы, при которой её несущая способность сохраняется; $h_{\text{к}}$ – измерен-ная глубина коррозионного повреждения стенки трубы; $v_{\text{кор}}$ – скорость корро-зии, определяемая из условия её пропорциональности за период $t_{\text{к}}$ коррозион-ного воздействия:

$$v_{\text{кор}} = \frac{h_{\text{к}}}{t_{\text{к}}}. \quad (29)$$

Решив совместно (27)...(29), получаем окончательное выражение для расчета остаточного ресурса коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб

$$R_{\text{ост}} = t_{\text{к}} \cdot (0,0625 \cdot \delta_{\text{н}} - h_{\text{к}}) \cdot h_{\text{к}}^{-1}. \quad (30)$$

в) расчет остаточного ресурса коррозионно-поврежденных НКТ на основе лабораторных исследований скорости коррозии трубных образцов; в этом слу-чае значение остаточного ресурса $R_{\text{ост}}$ определится из выражения

$$R_{\text{ост}} = \frac{0,0625 \cdot \delta_{\text{н}} - h_{\text{к}}}{v_{\text{кор}}}, \quad (31)$$

где $v_{\text{кор}}$ – измеренная скорость коррозии трубных образцов в лабораторных ус-ловиях.

В работе для примера приводится таблица с результатами расчета оста-точного ресурса для гладких НКТ $\varnothing 48$ мм, находившихся в консервации $t_{\text{к}} = 10$ лет, применительно к основным нефтегазовым месторождениям ТПНГП. Зна-чения $R_{\text{ост}}$ определены в статике (консервация) и динамике (добыча, нагнета-ние) для скважинных (обескислороженная коррозионная среда) и поверхност-ных (естественная кислородонасыщенность) условий, что позволяет получить оценку преимущественности дальнейшей эксплуатации труб.

В пятой главе диссертации рассмотрен пример практического применения разработанной методики по оценке технического состояния коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб, находившихся в среде глинистого раствора законсервированной скважины в течение 27 лет, с целью выявления возможности их дальнейшей эксплуатации по прямому назначению; исследования проводились в три этапа: на первом этапе по представительским образцам выполнена оценка текущего технического состояния обследуемых НКТ, в результате чего установлена пригодность обследуемых коррозионно-поврежденных НКТ для последующей эксплуатации с условием уточнения допустимых эксплуатационных параметров; на втором этапе установлены ограничения по допустимой глубине спуска обследуемых труб, которая уменьшилась по сравнению с первоначальной в 1,43 раза (29,8%), и разработаны рекомендации по коррозионной совместимости с различными скважинными жидкостями нефтегазовых месторождений центральной части Тимано-Печорской НГП; на третьем этапе оценён остаточный ресурс обследуемых НКТ с учётом различных условий дальнейшей эксплуатации труб: в условиях, аналогичных предыдущему периоду, остаточный ресурс эксплуатации оценивается в $R_{ост}=43,6$ года; в условиях скважинных сред нефтегазовых месторождений этот ресурс уменьшается кратно и для скважин, например, Вуктыльского газоконденсатного месторождения составляет $R_{ост}=(3,4...6,8)$ года.

Разработана и утверждена в ООО «Газпром переработка» «Методика оценки технического состояния коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб».

Основные выводы:

1) В результате анализа установлено, что действующая система контроля эксплуатационной пригодности насосно-компрессорных труб является эффективной, но не содержит требований к количественной оценке текущего технического состояния, что наиболее актуально для коррозионно-поврежденных труб, т. к. ионный обмен в минерализованных средах способствует деградации структуры металла, снижая его эксплуатационные качества.

2) Разработан алгоритм совершенствования методов оценки технического состояния коррозионно-поврежденных НКТ по запасу остаточного объема металла, ограничению условий эксплуатации, коррозионной совместимости и остаточному ресурсу.

3) Обоснован исследовательский научно-методический комплекс, обеспечивающий совершенствование методов оценки технического состояния НКТ, подвергшихся коррозии.

4) Разработана методика оценки текущего технического состояния насосно-компрессорных труб при сплошной коррозии их поверхности для выявления степени опасности коррозионного повреждения по визуально-оптическим и

приборно-инструментальным измерениям, на основе которых судят о степени влияния факторов коррозии на кристаллическую структуру металла.

5) Разработана методика лабораторного определения объема потери металла на коррозию, основанную на принципе прямого измерения глубины коррозионного повреждения, что позволяет оценить текущий запас объема остаточного металла и принять решение о пригодности коррозионно-поврежденных НКТ к дальнейшей эксплуатации.

6) Разработана методика оценки ограничительных условий эксплуатации коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб при дальнейшем использовании их по прямому назначению, основанная на комплексе металлографических, прочностных и коррозионных испытаниях, в результате которых определяется возможно допустимая глубина спуска труб в скважину и оценивается их коррозионная совместимость со скважинной жидкостью предполагаемого места использования.

7) Разработана методика оценки остаточного эксплуатационного ресурса коррозионно-поврежденных НКТ на основе вероятностного подхода с условием статистических измерений первоначальной толщины стенок труб, на основе прямого измерения глубины коррозионного повреждения за период коррозионного воздействия t_k и на основе лабораторных измерений скорости коррозии трубных образцов в различных пластово-скважинных средах.

8) Рассмотрен пример практического применения разработанной методики по оценке технического состояния коррозионно-поврежденных насосно-компрессорных труб, находившихся в среде глинистого раствора законсервированной скважины в течение 27 лет, с целью выявления возможности их дальнейшей эксплуатации по прямому назначению.

9) Разработана и утверждена в ООО «Газпром переработка» «Методика оценки коррозионного повреждения насосно-компрессорных труб в процессе эксплуатации».

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Селиванов, Д. Г. Обзор проблемы коррозионного растрескивания под напряжением металла труб [Текст] / Д. Г.Селиванов, И. Ю. Быков // VIII Научно-техническая конференция «Севергеозкотех-2007»: материалы конференции (21–23 марта 2007 г., Ухта). – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 57-62.

2. Селиванов, Д. Г. Результаты лабораторных испытаний по определению скорости коррозии [Текст] / Д. Г.Селиванов, И. Ю. Быков // X Научно-техническая конференция «Севергеозкотех-2009»: материалы конференции (18–20 марта 2009 г., Ухта). – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 295–298.

3. Селиванов, Д. Г. Дефекты магистральных нефтепроводов и методы их устранения [Текст] / Д. Г. Селиванов, И. Ю. Быков // IX Научно-техническая конференция: материалы конференции (15-18 апреля 2008 г., Ухта). – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 166-169.

4. Селиванов, Д. Г. Методика оценки состояния НКТ [Текст] / Д. Г. Селиванов, И. Ю. Быков // X Научно-техническая конференция: материалы конференции (15-18 апреля 2009 г., Ухта). – Ухта: УГТУ, 2010. – С. 99–101.

5. Селиванов, Д. Г. Анализ причин развития коррозионных процессов на внутренней поверхности продуктопроводов [Текст] / Д. Г. Селиванов, Т. Д. Ланина // Тез. докл. IX научно-технической конференции молодёжи ОАО «Северные МН - 2008»: материалы конференции (2009 г., Ухта). – Ухта: УГТУ, 2008. – С. 26–27.

6. Селиванов, Д. Г. Балльная оценка коррозионной активности скважинных сред, содержащих пластовую воду [Текст] / Д. Г. Селиванов, И. Ю. Быков // Научно-технический журнал «Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море». – М. : «ВНИИОЭНГ», 2009. – №11. – С. 40–45.

7. Методика оценки коррозионного повреждения насосно-компрессорных труб в процессе эксплуатации // Составители: И. Ю. Быков, Д. Г. Селиванов. – Ухта, ООО «Газпром переработка», 2010. – 34 с.