

На правах рукописи



Ашарин Сергей Николаевич

**РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ
МОРСКИХ ГАЗОПРОВОДОВ**

25.00.19 – Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Обществе с ограниченной ответственностью
«Научно-исследовательский институт природных газов и газовых
технологий – Газпром ВНИИГАЗ» (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

- Научный руководитель - кандидат технических наук
Запевалов Дмитрий Николаевич
- Официальные оппоненты - **Великоднев Валерий Яковлевич,**
доктор технических наук, технический директор
ООО «Центр ЭТСИ»
Завьялов Алексей Петрович,
кандидат технических наук, доцент, главный
технолог АО «Газпром оргэнергогаз»
- Ведущая организация - ООО «Экспертно-Инжиниринговая Компания»

Защита состоится «20» июня 2018 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 511.001.03, созданного на базе ООО «Газпром ВНИИГАЗ» по адресу: 142717, Московская обл., Ленинский р-н, сельское поселение Развилковское, поселок Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и на сайте <http://www.vniigaz.gazprom.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Курганова Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для морских нефтегазопроводных систем в настоящее время используют пассивную (лакокрасочные и защитные покрытия) и активную защиту от коррозии. Активная защита состоит в наложении катодного тока, замедляющего коррозию трубопроводов до допустимых величин. Для оценки степени защиты от коррозии существуют такие критерии как потенциал сооружения, измеренный относительно эталонного электрода сравнения, и плотность тока катодной защиты. Оценка потенциала сооружения, как правило, является основным критерием эффективности защиты от коррозии. Нормирование плотности защитного тока в практике отечественной противокоррозионной защиты зачастую не используется. Однако, ряд зарубежных авторов указывают, что для достижения необходимого уровня защиты от коррозии требуется определенная плотность тока.

В научных публикациях описан ряд факторов, оказывающих влияние на скорость коррозии и, соответственно, на плотность тока защиты в морской воде. Этими факторами являлись: температура, соленость, скорость потока морской среды и напряженное состояние стали нефтегазопроводных систем. Рядом исследователей были изучены степени влияния каждого фактора по отдельности. Так как море является многофакторной системой, следовательно, актуальным являлось изучение одновременного воздействия этих факторов на коррозионные и электрохимические характеристики малоуглеродистой трубной стали. Под электрохимическими и коррозионными характеристиками подразумеваются: критерии защитного потенциала и плотности тока защищаемого сооружения, смещение потенциала относительно стационарного для достижения необходимого уровня защиты от коррозии, а также стационарный потенциал и скорость коррозии.

Целью работы является разработка критериев и методов защиты от коррозии морских газопроводов, добывающих платформ и подводных стальных сооружений, в том числе обетонированных, с учетом воздействия факторов окружающей среды и специфики морских условий.

Основные задачи исследований

- выявление значимости факторов, влияющих на коррозионно-электрохимические характеристики малоуглеродистой стали для подводных трубопроводов в различных морских условиях;

- экспериментальная проверка методов контроля коррозионного состояния и осуществимости электрохимической защиты обетонированных трубопроводов в модельных средах;

- исследование электрохимических свойств малоуглеродистых трубных сталей в модельной морской воде в условиях физического нагружения образцов, приводящего к возникновению упругих деформаций различной интенсивности;

- усовершенствование методов и критериев электрохимической защиты морских нефтегазопроводных систем.

Научная новизна полученных результатов

Впервые определена возможность контроля коррозионного состояния обетонированных трубопроводов типа «труба в трубе» в морской воде.

Создана и запатентована установка исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах.

Исследована степень влияния значимых коррозионных факторов (температуры, скорости потока, солёности и напряжённого состояния металла) на электрохимические свойства малоуглеродистой трубной стали в модельной морской воде и доказано, что при увеличении скорости движения электролита значения параметров плотности тока защиты от коррозии должны иметь повышенные значения по сравнению со статичной средой.

Проведен регрессионный анализ для определения коэффициентов значимости коррозионных факторов на скорость коррозии в морской воде. По результатам исследований выявлены зависимости скорости коррозии стали, защитного потенциала и плотности тока защиты от переменных величин коррозионных факторов окружающей среды, что позволяет рассчитывать усовершенствованные параметры электрохимической защиты морских нефтегазопроводных систем от коррозии, зависящие от меняющихся морских условий внешней среды.

Теоретические основы и методы диссертационного исследования

При проведении диссертационного исследования применялись методы теоретических и экспериментальных изысканий, а именно анализ существующих методов и критериев электрохимической защиты морских нефтегазопроводных объектов, компьютерное моделирование установки для исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах, математическое планирование эксперимента, проведение лабораторного исследования, регрессионный анализ полученных данных, а так же создание компьютерной программы, производящей расчет электрохимических характеристик исследуемой стали в пределах изученных факторных диапазонов.

Защищаемые положения

1. Экспериментальное подтверждение возможности защиты от коррозии катодным током трубопроводов с утяжеляющими покрытиями в металлополимерной оболочке и уложенных в морскую воду через неизолированные торцевые поверхности утяжеляющего покрытия на каждой трубе.

2. Методы и технические средства для экспериментальной оценки влияния факторов, отвечающих за агрессивность среды (температура, скорость потока, солёность и напряжённое состояние стали), на коррозионно-электрохимические характеристики трубных сталей при расположении образцов вдоль и поперек течения морской воды.

3. Экспериментальное обоснование критериев электрохимической защиты от коррозии морских нефтегазопроводных систем при различном сочетании факторов с построением регрессионных уравнений, позволяющих определять величины защитных токов и потенциалов во всех исследованных диапазонах значений коррозионных факторов.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность исследования обоснована обобщением имеющихся в научной литературе базисов теоретических и практических данных по электрохимической защите морских объектов отечественных и зарубежных авторов. В результате эксперимента и анализа измеренных значений получены данные электрохимических свойств стали в различных факторных диапазонах, имеющие общую основу и коррелирующиеся с опубликованными результатами исследований ученых в этой области.

Практическая значимость

Результаты работы использованы при разработке рекомендаций по применению электрохимической защиты морских нефтегазопроводных систем: Р Газпром 9.2-026-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты морских трубопроводов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-032-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты портовых сооружений ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-034-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты подводных добычных комплексов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-033-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты морских платформ ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-037-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга морских трубопроводов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-037-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга портовых сооружений ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-040-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга подводных добычных комплексов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.5-053-2016 Оборудование и технические средства для комплексного дистанционного мониторинга морских участков трубопроводов большего диаметра. Основные технические требования.

Апробация работы

Основные научные положения диссертации докладывались на IV Международной конференции “Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток «ROOGD-2012»” (ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, 2012), на Международной конференции “Противокоррозионная защита – ключ к энергетической и экологической безопасности” (РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2013г.), на VI Международной научно-технической конференции “Газотранспортные системы: настоящее и будущее «GTS-2015»” (Газпром ВНИИГАЗ, 2015г.) и на III международной конференции “Фундаментальные аспекты коррозионного материаловедения и защиты металлов от коррозии” (ИФХ РАН, 2016г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, 6 из них входят в “Перечень...” ВАК Минобрнауки РФ, 2 патента на полезные модели и 1 патент на изобретение.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов, изложена на 145 страницах, содержащих 36 рисунков, 33 таблицы, 181 наименование в списке использованных источников, и приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, защищаемые положения и реализация результатов исследования.

В первой главе приведен анализ существующих отечественных и зарубежных исследований причин коррозионных повреждений подводных морских трубопроводов, объектов добычи и транспорта газа и других сооружений, а также способы их защиты от коррозии. На основе анализа данных специфики морских условий выявлены факторы окружающей среды, оказывающие непосредственное влияние на количественные и качественные показатели процесса коррозии. Описаны конкретные случаи, при которых происходили максимальные коррозионные повреждения морских сооружений за короткий промежуток времени. Показано влияние каждого из значимых факторов (солености, скорости течения, температуры и физической нагрузки) на скорость коррозии и на изменения значений потенциала малоуглеродистой стали обетонированных и необетонированных морских конструкций (включая магистральные трубопроводы). Проанализированы основные руководящие документы по проектированию и эксплуатации морских нефтегазопроводных систем.

Основное внимание исследователей уделялось обоснованию и выбору необходимых критериев защиты для повышения эффективности эксплуатации электрохимической защиты (ЭХЗ) подводных объектов морских акваторий. В отечественной и зарубежной литературе и нормативных документах основным критерием защиты считается потенциал защиты в диапазоне значений от - 0,8 В до - 1,2 В, измеренный между электродом сравнения и защищаемым подводным сооружением. Еще одним важным критерием защищенности морских сооружений от коррозии является плотность тока защиты, которая зависит от изменяющихся внешних агрессивных факторов при поддержании необходимого потенциала защиты в указанном диапазоне. Ранее в научной литературе приводились сведения по необходимым критериям защиты для каждого отдельного фактора окружающей среды. Исследованиями по определению влияния морской среды на коррозию объектов подводной инфраструктуры и выработкой критериев защиты для таких сооружений занимались отечественные и зарубежные ученые: Томашов Н.Д., Негреев В.Ф., Фархадов А.А., Шамшетдинов К.Л., Шумахер М., Бэкман В., Наск Н., Hartt W., Fisher K., Baboian R. и другие.

Анализ данных показал, что критерии защищенности морских нефтегазопроводных объектов при одновременном воздействии нескольких значимых внешних агрессивных факторов окружающей среды малоизучены и требуют уточнения и систематизации с целью повышения энергоэффективности при проектировании систем ЭХЗ.

Во второй главе приведены описание и характеристики экспериментальной установки по исследованию электрохимических характеристик малоуглеродистых трубных сталей, учитывающих специфику морских условий. Суть их изложена в пяти методиках, разработанных при непосредственном участии автора.

В первой методике приведены результаты исследования на трубе с утяжеляющим покрытием и металлополимерной оболочкой конструкции «труба в трубе» длиной 4,5 м, с основным защитным покрытием трубы на основе трехслойного экструдированного полиэтилена.

Контроль параметров электрохимической защиты образца осуществлен за счет расположения внутри заполненного бетонной смесью пространства ряда датчиков, имитирующих сквозные дефекты основного полимерного защитного покрытия трубы, и средств контроля параметров ЭХЗ. В комплект размещаемых средств контроля вошли электроды сравнения (ЭС) длительного действия «ДЭС-1», датчики скорости коррозии ИКП 10-012 и трехэлектродные датчики линейного поляризационного сопротивления к прибору Эксперт-004. Подготовленный к дальнейшим испытаниям образец помещался в ванну с водным раствором 3% NaCl (концентрация 30 г/л) – имитирующим морскую воду.

Исследование проводилось для режимов без внешнего наложенного тока электрохимической защиты и с внешним наложенным током с использованием источника тока и размещенного в ванне стального анода. Поляризацию осуществляли при последовательном изменении выходного тока источника питания в следующей последовательности (mA): 5, 10, 20, 30, 40, 50, 100.

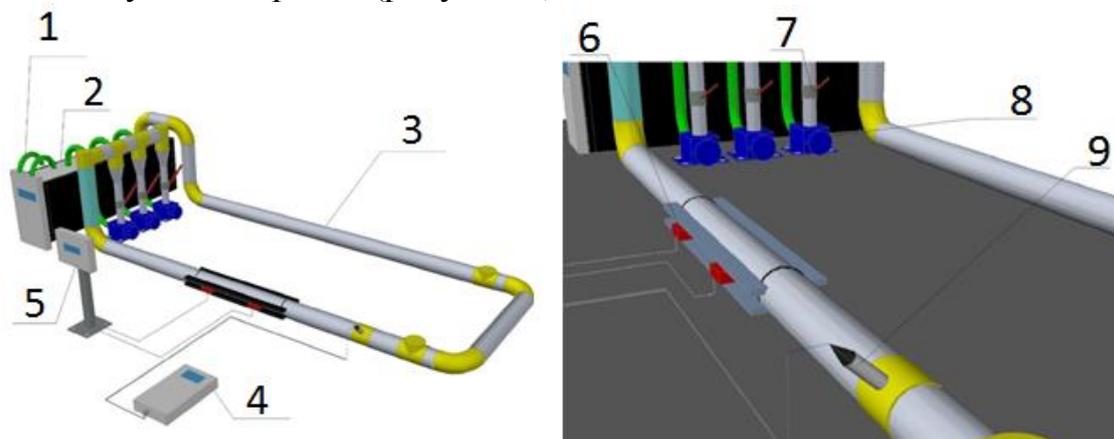
Во второй методике описаны исследования по оценке влияния физической нагрузки на коррозионные характеристики стали в морской воде.

Для испытаний были взяты образцы (электроды) из малоуглеродистой трубной стали поперечным сечением 2,7 мм. На поверхность электродов, контактирующую с электролитом, наносился слой нейтрального (не изменяющего потенциал) лака, с неизолированной рабочей поверхностью электрода (стержня) 1,61 см². Электрод устанавливался в стенд, моделирующий постоянные во времени растягивающие напряжения, а рабочая поверхность электрода помещалась в рабочую ячейку. Она состояла из емкости, заполненной 3% раствором NaCl, имитирующим морскую воду, установленными вспомогательным платиновым электродом и хлорсеребряным электродом сравнения. Далее, при помощи потенциостата получены поляризационные диаграммы и определены поляризационные характеристики стали.

Поляризационные диаграммы сняты на рабочем электроде в ненагруженном состоянии и после нагружения растягивающим усилием, соответствующим 1500 Н/мм – верхней точке области упругой деформации.

После стабилизации стационарного потенциала рабочего электрода снимали поляризационные кривые из анодной области (от - 0,35 В) в катодную область (до -1,2 В (являющимся максимальным защитным потенциалом +0,05 В)), с изменением знака тока при переходе через стационарный потенциал. Поляризационные кривые построены в полулогарифмических координатах.

В третьей методике описаны исследования оценки влияния воздействия трех значимых факторов окружающей среды (температуры, скорости потока и солености воды) на скорость коррозии трубных сталей класса прочности X70 в морской воде при помощи трехэлектродного датчика линейного поляризационного сопротивления и установки для исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах (рисунок 1).

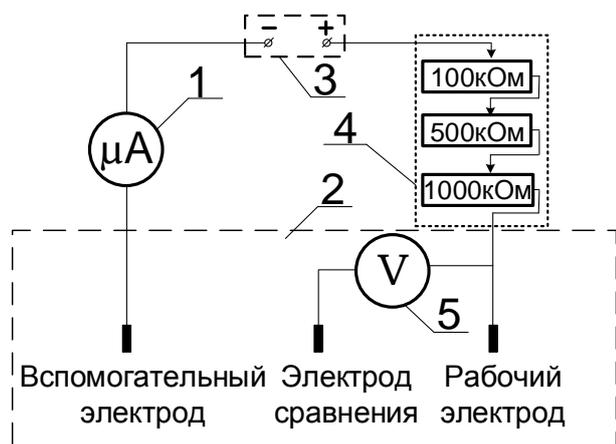


1 - водонагреватель; 2 - емкость для воды; 3 - пластиковые трубы;
4 – коррозиметр; 5 - индикатор скорости потока; 6 - датчик скорости потока; 7 - шаровый кран; 8 - насос; 9 - трехэлектродный датчик (или электрохимическая ячейка)

Рисунок 1 - Установка для исследования электрохимических процессов

Установка имеет замкнутую гидравлическую систему и позволяет регулировать скорость течения, температуру и соленость водной среды. Работа установки в пробных режимах испытаний позволила обеспечить максимальную скорость потока 0,6 м/с с изменением температуры в диапазоне от +2 до +35 °С, имитируя реальные условия морской среды.

В четвертой методике описаны исследования по оценке влияния трех значимых факторов морской среды (температуры, скорости потока и солености воды) на электрохимические свойства малоуглеродистой трубной стали. Для этого потребовалось заменить трехэлектродный датчик скорости коррозии (9) (рисунок 1) на запатентованную ранее электрохимическую ячейку, добавить некоторые элементы в электрическую цепь (рисунок 2) и увеличить фактор скорости потока до 0,9-1,7 м/с путем добавления дополнительных насосов.



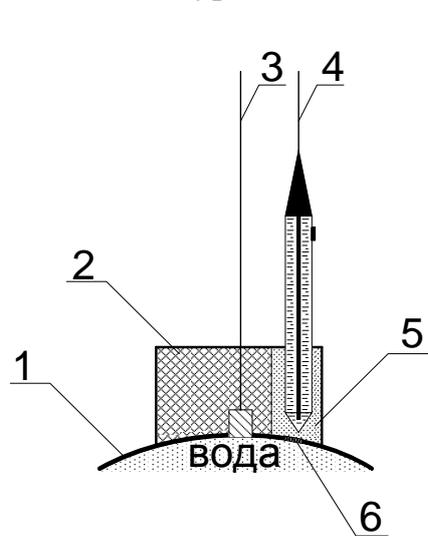
1 - амперметр;
2 - электрохимическая ячейка;
3 - источник тока;
4 - переменное сопротивление;
5 – вольтметр

Рисунок 2 - Измерительная схема эксперимента

Это позволило смоделировать одновременное влияние скорости течения, солености и температуры на коррозионно-электрохимические свойства стали в модельной морской воде.

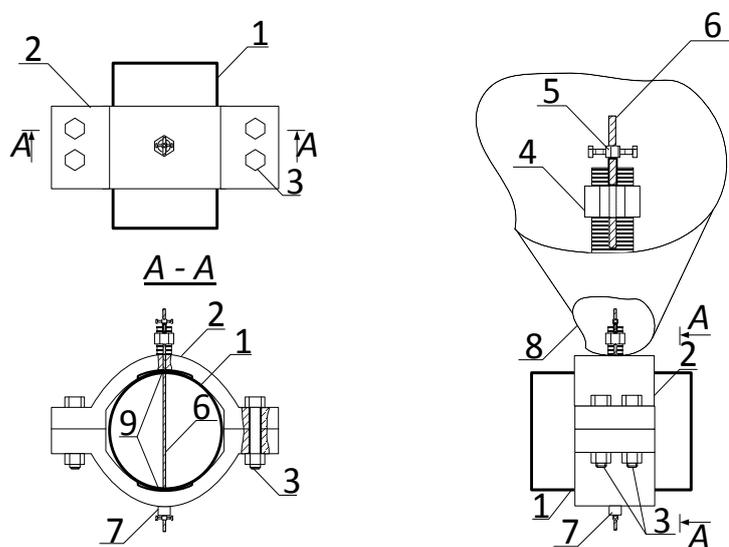
В пятой методике описана оценка степени влияния четырех значимых факторов морской среды (температуры, скорости потока, солености и напряженного состояния стали) на скорость коррозии и параметры защищенности от коррозии малоуглеродистой трубной стали в модельной морской воде.

На основе ряда ранее проработанных решений была усовершенствована запатентованная ячейка для исследования электрохимических процессов. Ячейка состоит из 2 основных частей: статической (рисунок 3), со вспомогательным платиновым электродом, электродом сравнения (х.с.э.) и динамической (рисунок 4), с рабочим электродом, подвергаемым растяжению с целью моделирования заданного уровня его напряженного состояния.



1 – стенка трубы; 2 – корпус ячейки; 3 – платиновый (вспомогательный) электрод; 4 – хлорсеребряный электрод; 5 – пористая среда с насыщенным раствором NaCl; 6 – капиллярная мембрана.

Рисунок 3 – Схема электрохимической ячейки (статическая часть)



1 – труба; 2 – хомут;
3 - болт с гайкой; 4 – гайка;
5 - стопорный зажим; 6 - стержень (электрод);
7 - нижний блок стержня;
8 - верхний блок стержня;
9 - уплотнительные прокладки.

Рисунок 4 - Схема динамической части ячейки с рабочим электродом.

Для определения границы линейной упругой области деформации перед проведением эксперимента выполнена калибровка электродов на разрывной машине ИР 5047-50. Для этого применялись тензорезисторы на основе тонких пленок марки TML FLK-1-11 (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd). При помощи миллиметра GOM-802 измерялось электрическое сопротивление тензорезистора.

Были получены зависимости удлинения образца из малоуглеродистой трубной стали диаметром 2 мм от приложенной нагрузки. Вычислена необходимая точка, соответствующая максимальной нагрузке в точке линейной упру-

гой области деформации электрода, которая составила 2400 – 2600 Н/мм, этой точке было присвоено условное обозначение “1” («нагрузка»).

Далее электрод размещался в динамической части ячейки (рисунок 4) и закреплялся зажимами. Для выставления необходимой нагрузки в ячейке использовали резьбу с гайкой. При помощи динамометрического ключа выставлялась нагрузка, соответствующая точке “1”, таким образом на рабочий электрод накладывалась нагрузка необходимого значения.

Для проведения исследований использована измерительная схема, аналогичная с трехфакторным экспериментом (рисунок 2).

В третьей главе представлена экспериментальная часть работы с описанием результатов исследований электрохимических свойств трубных сталей в различных моделируемых морских условиях.

Экспериментальная оценка степени защищенности от коррозии обетонированных нефтегазопроводных систем приведена в двух режимах: без наложения тока катодной защиты и под действием катодной поляризации.

Проведены измерения потенциалов на датчиках ЭС (ДЭС-1) и скорости коррозии в ходе проведения измерений. Полученные данные свидетельствуют о том, что в моделируемых морских условиях наложением катодной поляризации достигнуты потенциалы от минус 0,75 до минус 1,22 В и обеспечен ток поляризации плотностью до 20 А/м² (2000 мкА/см²).

По результатам экспериментальных исследований степени защищенности от коррозии обетонированных сооружений установлено, что:

- трубопроводы, выполненные из труб с утяжеляющими покрытиями в металлополимерной оболочке и уложенные в море, могут быть защищены наложенным током катодной защиты или протекторной защитой через не изолированные торцевые поверхности утяжеляющего покрытия на каждой трубе;

- контроль защищённости металла морских трубопроводов под металлополимерной оболочкой и утяжеляющим покрытием может быть реализован с применением датчиков потенциала, электродов сравнения и датчиков скорости коррозии, установленных в утяжеляющем покрытии под металлополимерной оболочкой;

- электроды сравнения в комплекте с датчиками потенциала позволяют измерять необходимый для оценки критериев защищенности набор параметров: потенциал свободной коррозии, потенциал при воздействии катодной защиты, смещение потенциала, плотность катодного тока;

- в условиях катодной поляризации модельного участка трубопровода с утяжеляющим покрытием в металлополимерной оболочке подтверждена возможность обеспечения электрохимической защиты дефектов основного полимерного покрытия в соответствии с нормативными критериями защищенности для морских трубопроводов.

Результаты исследований по определению влияния электрохимических свойств малоуглеродистой стали под действием максимальной нагрузки в области упругой деформации стали и без нее на скорость коррозии в модельной морской воде (3% раствор NaCl) представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Стационарные потенциалы электрода из малоуглеродистой трубной стали в ячейках 1-3 до и после приложенной нагрузки 1500 Н/мм

Потенциал, (мВ)					
Ячейка 1		Ячейка 2		Ячейка 3	
Без нагрузки	С нагрузкой 1500 Н/мм	Без нагрузки	С нагрузкой 1500 Н/мм	Без нагрузки	С нагрузкой 1500 Н/мм
-0,534 ± 0,007	-0,645 ± 0,015	-0,540 ± 0,005	-0,611 ± 0,023	-0,530 ± 0,008	-0,639 ± 0,019

Из таблицы 1 следует, что при наложении нагрузки на рабочий электрод его стационарный потенциал смещается в отрицательную область на 70 - 90 мВ. Это свидетельствует о влиянии физической нагрузки на электрохимические характеристики малоуглеродистой трубной стали.

На рисунке 5 стрелками показан способ определения тока коррозии (проекция пересечения катодной и анодной кривых на ось абсцисс) до приложения нагрузки (кривая 1) и при воздействии растягивающего усилия (кривая 2), соответствующая нагрузке 1500 Н/мм.

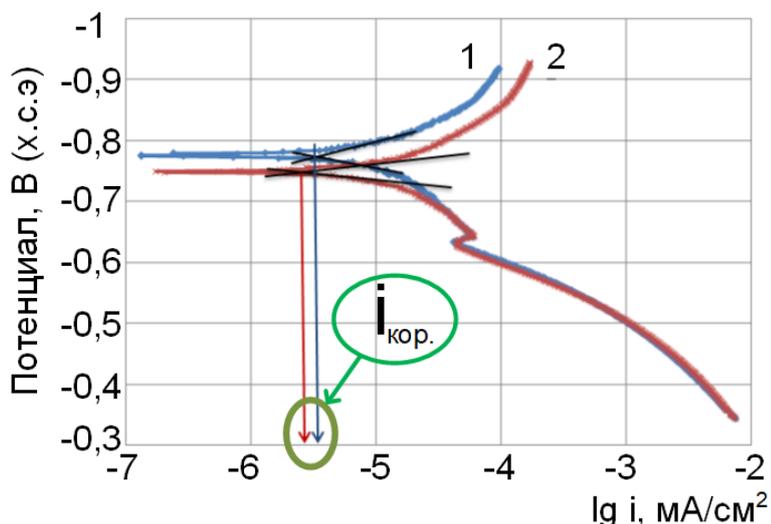


Рисунок 5 – Поларизационная кривая, снятая на образце из малоуглеродистой трубной стали в 3% (30 г/л) растворе NaCl (ячейка 2) до приложения нагрузки (1) и после приложения нагрузки 1500 Н/мм.

На пересечении начальных линейных логарифмических участков анодных и катодных кривых в области потенциалов $E_{ст} \pm 0,025$ В определялась плотность тока коррозии (мА/см²). Точковый показатель скорости коррозии (мА/см²) переводили в объемный (мм/год, таблица 2) по формуле (1):

$$K = 3,267(1/z) \left\{ \frac{Ai}{\rho} \right\} = \frac{3,267}{2} \frac{55,85}{7,86} i = 11,6i \quad , \quad (1)$$

где K – скорость коррозии, мм/год; z - число электронов, переносимых в процессе коррозии; ρ – плотность металла, г/см³; A – атомная масса железа, г; i – ток коррозии, мА/см².

Полученные данные (Таблица 2) свидетельствуют о том, что скорость коррозии стали в ненагруженном состоянии несколько выше, чем при приложенной растягивающей нагрузке.

Таблица 2 - Показатели скоростей коррозии экспериментальных образцов без нагрузки и под нагрузкой 1500 Н/мм, полученные при обработке поляризационных кривых

	Величина растягивающей нагрузки, Н/мм	
	0	1500
Скорость коррозии K , мм/год	$0,027 \pm 0,011$	$0,024 \pm 0,002$

Далее представлена оценка степени совместного влияния на скорость коррозии стали трех факторов (температура, скорость потока и соленость) в модельной морской воде. На рисунке 6 (а, б) представлены графики зависимости скорости коррозии конструкционной малоуглеродистой трубной стали от температуры и скорости потока раствора при различной солености.

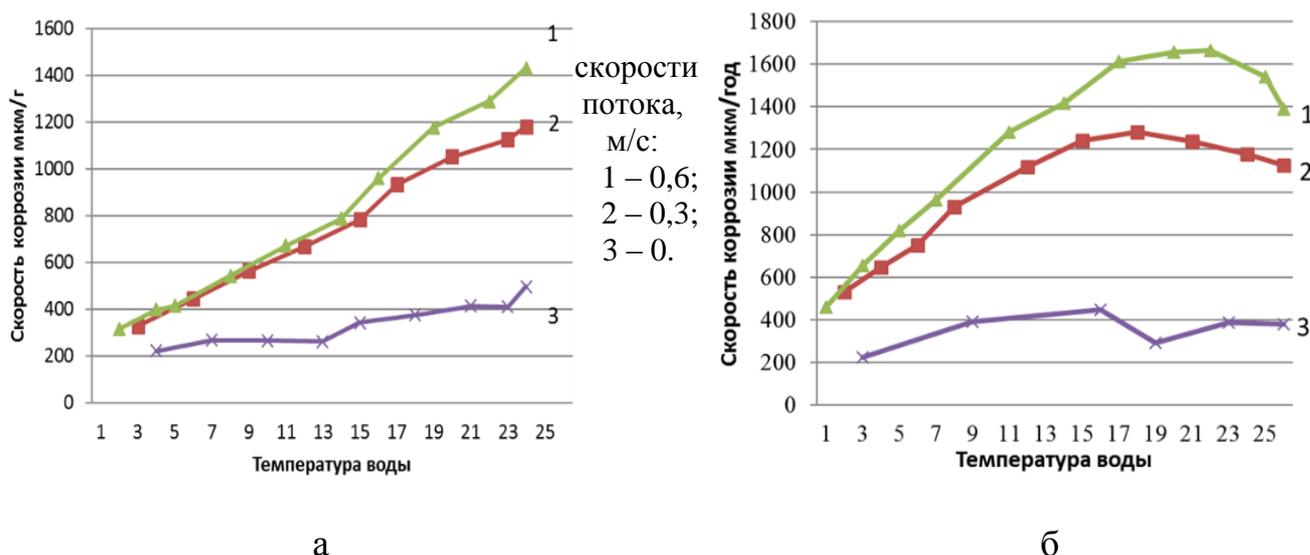


Рисунок 6 - График зависимости скорости коррозии от температуры электролита при солености: а - 0,3 % NaCl (3 г/л), б - 3% NaCl (30 г/л)

Использован трехэлектродный датчик, работающий по методу линейного поляризационного сопротивления. Electrodes were made of pipe steel of the 10Г2ФБЮ class of strength X70 (K 60). From the graphs (figure 6) it is visible that with an increase in the flow rate (in the given conditions: flow rate 0...0,6 m/s and temperature from 2 to 20 °C) the corrosion rate increases.

По результатам исследований на экспериментальной установке по измерению скорости коррозии в движущихся средах выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на защищенность от коррозии морских нефтегазопроводных сооружений: температура, скорость течения и соленость среды.

Проведена серия измерений для исследования электрохимических свойств малоуглеродистой стали в движущейся среде с тремя значимыми факторами.

Важным моментом в эксперименте являлось расположение рабочего электрода из трубной стали *вдоль* внутренней поверхности трубопровода, причем рабочая поверхность электрода, обращенного к электролиту, располагалась заподлицо с внутренней поверхностью трубопровода с тем, чтобы рабочий рас-

твор обтекал ламинарно поверхность стального электрода. Создаваемые при этом коррозионные условия соответствовали сравнительно малой скорости коррозионных процессов по сравнению с условиями, изложенными ниже в четырехфакторном эксперименте. Проводилось математическое планирование эксперимента (таблица 3).

Таблица 3 – Кодирование факторных уровней

Код	Факторы		
	X ₁ (°C)	X ₂ (NaCl, г/л)	X ₃ (м/с)
Минимальный уровень (-)	6 ± 5	3	0,9
Максимальный уровень (+)	20 ± 5	30	1,7

Три значимых фактора закодировали следующим образом: x₁ – температура (t⁰C), x₂ – соленость (NaCl, г/л), x₃ – скорость потока (м/с) и отклик y₁(K) – скорость коррозии (мм/год). Каждый из факторов варьировался на двух уровнях от “-“ до “+”, кроме того была составлена матрица планирования эксперимента 2³.

Снимали кривые ток – потенциал из анодной области в катодную с прохождением потенциала коррозии. Используя метод поляризационного сопротивления получали скорость коррозии, выраженную токовым показателем при экстраполяции пересечения линейных частей катодной и анодной кривых на ось абсцисс. Точное определение плотности тока коррозии осуществляли по формуле (2):

$$i_{кор} = \frac{b_k - b_a}{2,3(b_k + b_a)} \cdot \frac{\Delta i}{\Delta E} \quad (2)$$

где: $i_{кор}$ – плотность тока свободной коррозии, А/м²; b_k и b_a – тафелевские наклоны анодной и катодной кривых, В; ΔE – сдвиг потенциала, В; Δi – сдвиг тока, А/м².

Из поляризационных кривых определялись потенциалы свободной коррозии на пересечении катодной и анодной кривых и экстраполяцией на ось ординат. Токковый показатель скорости коррозии (мА/см²) переводился в глубинный (мм/год) по формуле (1).

На рисунке 7 представлены экспериментальные поляризационные кривые, снятые в растворе 0,3 % NaCl (3 г/л) при скорости потока электролита 1,7 м/с и температуре 9 °C (рисунок 10 а), при скорости потока 0,9 м/с и температуре 11 °C (рисунок 10 б), с термостатированием в течение всего эксперимента.

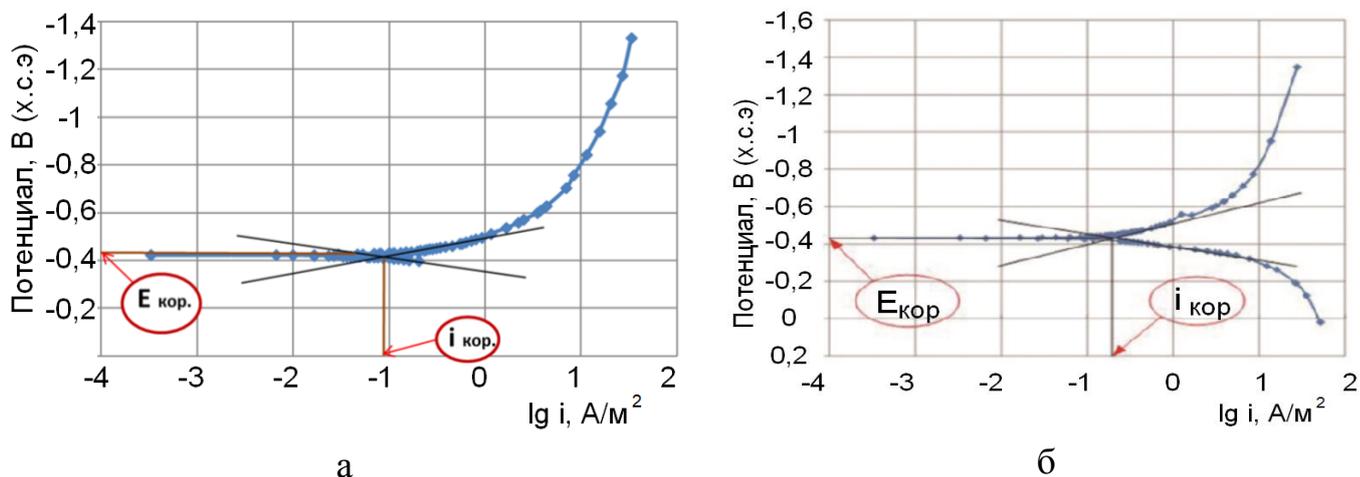


Рисунок 7 - Поляризационные кривые, снятые на электроде из малоуглеродистой трубной стали в растворе NaCl 3 г/л: а - скорость потока 1,7 м/с, температура 9 °С; б - скорость потока 0,9 м/с, температура 11 °С; $E_{кор}$ – потенциал коррозии; $i_{кор}$ – ток коррозии.

Сравнение графиков на рисунке 7 показало влияние фактора X_3 (скорость потока) на ток коррозии.

По результатам проводился регрессионный анализ, который заключался в определении аналитического выражения связи зависимой случайной величины с независимыми случайными величинами x_1, x_2, x_3 (3):

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m, \quad (3)$$

где y – значения результативного признака, полученные путем подстановки соответствующих значений факторных признаков в уравнение регрессии; x_1, x_2, \dots, x_m – значения факторных признаков; a_0, a_1, \dots, a_m – параметры уравнения (коэффициенты регрессии).

Рассчитанные значимые коэффициенты a_i позволили построить уравнение (4), выражающее зависимость скорости коррозии (K , мм/год) от x_1 – температуры ($t^{\circ}C$), x_2 – солёности (NaCl, г/л) и x_3 – скорости потока (м/с).

$$K = -0,33 + 0,020x_1 + 0,21x_2 + 0,20x_3. \quad (4)$$

Из уравнения видно, что наиболее сильно на скорость коррозии влияют солёность и скорость потока ($a_2 = 0,21$ и $a_3 = 0,20$ соответственно, причем их влияние близко), в меньшей степени температура ($a_1 = 0,02$). Положительный знак перед a_1, a_2 и a_3 показывает, что увеличение всех трех факторов приводит к росту параметра, в нашем случае скорости коррозии.

Получены также регрессионные зависимости стационарного потенциала, потенциалов защиты при смещении на 100 и 300 мВ от стационарного значения и соответствующие им критерии плотности тока защиты.

Для стационарного потенциала было построено следующее уравнение регрессии:

$$E_{стац} = -0,411 - 0,002x_1 - 0,002x_2. \quad (5)$$

Из уравнения видно, что на стационарный потенциал стали температура и соленость влияют одинаково ($a_1 = a_2 = 0,002$). Отрицательный знак перед a_1 и a_2 показывает, что увеличение значений двух факторов приводит к смещению стационарного потенциала в отрицательную сторону.

Для потенциалов защиты при смещении на 100 и 300 мВ от стационарного потенциала в катодную область уравнения регрессии принимают следующий вид:

$$E^{-100} = -0,511 - 0,002x_1 - 0,002x_2, \quad (6)$$

$$E^{-300} = -0,712 - 0,002x_1. \quad (7)$$

Для потенциала защиты со смещением 100 милливольт значимы два фактора (температура и соленость с одинаковыми коэффициентами $a_1 = a_2 = 0,002$), а для потенциала защиты со смещением 300 милливольт значима только температура (с коэффициентом $a_1 = 0,002$).

Отрицательный знак перед a_1 и a_2 (6) показывает, что увеличение значений двух факторов приводит к смещению потенциала E^{-100} в отрицательном направлении. Минус перед a_1 (7) свидетельствует о том, что увеличение значений температуры электролита приводит к смещению потенциала E^{-300} в отрицательном направлении.

В случае критериев токов защиты при смещении соответствующих им потенциалов E^{-100} и E^{-300} все три фактора оказываются значимыми (уравнения 8 и 9).

$$i^{+100} = -3,22 + 0,29x_1 + 2x_2 + 1,41x_3, \quad (8)$$

$$i^{+300} = -5,76 + 0,68x_1 + 4,34x_2 + 3,8x_3. \quad (9)$$

В обоих случаях самым сильным фактором является соленость ($a_2 = 2$ и $4,34$ соответственно), затем скорость течения ($a_3 = 1,41$ и $3,8$ соответственно), менее значимым фактором является температура ($a_1 = 0,29$ и $0,68$ соответственно). В случае токовых критериев защиты при смещении на 300 мВ коэффициенты больше в 2 раза по сравнению с коэффициентами уравнения 8.

По результатам стендовых испытаний на экспериментальной установке для исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах при изучении трех значимых факторов сделаны следующие выводы:

- в соответствии с матрицей планирования эксперимента получены результаты, показывающие интенсификацию протекания коррозионных процессов при максимальном значении фактора скорости движения среды при прочих равных условиях;

- увеличение температуры и солености модельного морского раствора приводят к смещению потенциала в отрицательную сторону, при этом поверхность стали становится более активной в коррозионном отношении;

- для потенциала защиты со смещением 100 милливольт значимы два фактора (температура и соленость), а для потенциала защиты со смещением 300 милливольт значима только температура;

- в случае критериев токов защиты при смещении соответствующих им потенциалов E^{-100} и E^{-300} все три фактора оказываются равнозначимыми, при

этом в обоих случаях самым сильным фактором является соленость, затем идет скорость течения, менее значимым фактором является температура;

- установлено влияние всех трех факторов на электрохимические процессы, протекающие на трубных сталях в условиях окружающей среды, максимально приближенных к морским условиям.

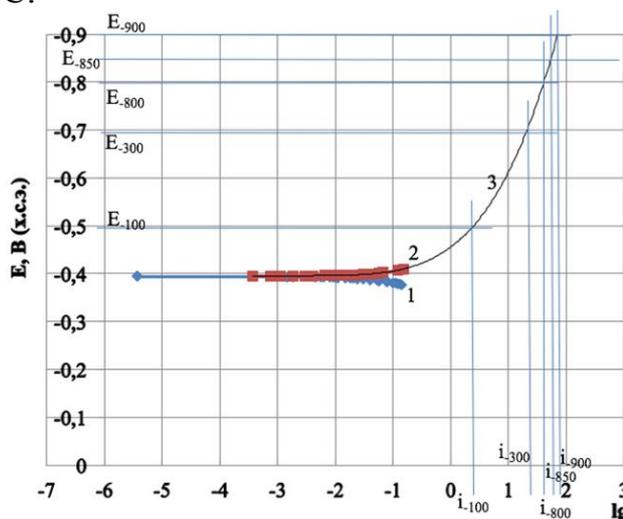
Проведена серия измерений для исследования электрохимических свойств стали в движущейся среде с четырьмя значимыми факторами.

Важным моментом в эксперименте являлось расположение рабочего электрода из стали *поперек движения электролита* внутри объема трубопровода, при этом рабочая поверхность электрода, выполненного из стержня, омывалась движущимся рабочим раствором, создавая коррозионные условия при которых скорость коррозии стали была бы максимальной.

Было проведено планирование четырехфакторного эксперимента. Обозначение факторов и границы задаваемых для них значений в ходе эксперимента аналогичны предыдущему эксперименту (таблица 3), с добавлением фактора x_4 – нагрузка на электрод, задающаяся в процентном соотношении от 0% обозначение - «0» до 100% обозначение - «1», где «1» – это 2400...2600 Н. Для каждого опыта снимали кривые ток – потенциал из анодной области в катодную с прохождением потенциала коррозии.

Из полученных кривых графическим методом вычислялась плотность тока коррозии ($i_{кор}$), стационарный и потенциал свободной коррозии при заданных условиях факторного эксперимента. Графическим методом вычислялись критерии плотности тока защиты при смещении от стационарного потенциала на 100 мВ, 300 мВ; при потенциале -0,8 В; при потенциале -0,85 В; при потенциале -0,9 В (рисунок 8).

На рисунке 8 представлена поляризационная кривая, снятая на электроде, выполненном из малоуглеродистой стали и находящемся под нагрузкой в растворе NaCl концентрацией 3 г/л при скорости потока 1,7 м/с и температуре 17 °С.



- 1 – анодная кривая;
- 2 – катодная кривая;
- 3 – расчетная полиномиальная катодная кривая;
- E_{100} , E_{300} – потенциалы при смещении на 100 и 300 мВ соответственно от стационарного потенциала;
- E_{800} , E_{850} и E_{900} – потенциалы при указанных значениях;
- i^{100} , i^{300} , i^{800} , i^{850} , i^{900} – критерии плотности тока, соответствующие потенциалам, обозначенным выше

Рисунок 8 - Поляризационная кривая, снятая на электроде, выполненном из малоуглеродистой трубной стали, и находящемся под нагрузкой в растворе NaCl концентрацией 3 г/л при скорости потока 1,7 м/с и температуре 17 °С.

Был проведен четырехфакторный регрессионный анализ и получены зависимости стационарного потенциала, потенциала коррозии и скорости коррозии от величин температуры (x_1 , °C), солености (x_2 , г/л), скорости потока (x_3 , м/с), и приложенной нагрузки (x_4 , %) на рабочий электрод (уравнения 10 - 12).

$$E_{\text{стац.}}(\text{мВ}) = -426,263 + 3,5789 \cdot x_1 - 0,7997 \cdot x_2 - 9,5211 \cdot x_3 - 39,3038 \cdot x_4, \quad (10)$$

$$E_{\text{корр}}(\text{мВ}) = -418,932 + 3,7569 \cdot x_1 - 0,9616 \cdot x_2 - 9,9037 \cdot x_3 - 40,2622 \cdot x_4, \quad (11)$$

$$K(\text{мм/год}) = 0,3666 - 0,00394 \cdot x_1 - 0,00075 \cdot x_2 + 0,09425 \cdot x_3 + 0,039477 \cdot x_4. \quad (12)$$

Из уравнений (10) и (11) видно, что фактор x_2 (соленость) оказывает наименьшее влияние на стационарный и потенциал коррозии в смоделированных морских условиях. Значения коэффициентов уравнений (10) и (11) свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на стационарный потенциал и потенциал коррозии оказывают нагрузка (39,30 и 40,26 соответственно) и скорость потока (коэффициенты 9,52 и 9,90 соответственно), в меньшей степени температура (3,57 и 3,75 соответственно). Наименьшее влияние имеет соленость среды (значения коэффициентов 0,79 и 0,96 соответственно). Знак минуса перед коэффициентами $a_2 - a_4$ показывает, что увеличение данных трех факторов приводит к уменьшению значения параметра – потенциала (стационарного или коррозии). Плюс перед коэффициентом a_1 приводит к облагораживанию потенциалов.

Из уравнений (10) – (12) видно, что увеличение скорости движения морской среды приводит к увеличению скорости коррозии и смещению стационарного потенциала и потенциала коррозии в отрицательном направлении, что свидетельствует об интенсификации протекания коррозионных процессов на поверхности стали при повышении скорости движения морской модельной среды в пределах, задаваемых экспериментом.

Из уравнений для стационарного потенциала и потенциала коррозии (10) и (11) также следует, что увеличение напряженного состояния металла приводит к разблагораживанию потенциала и, следовательно, к увеличению скорости коррозии, что подтверждает положительный знак коэффициента a_4 в уравнении (12).

Статистическая обработка данных влияния факторов на стационарный потенциал и потенциал коррозии показала, что все четыре фактора являются значимыми в моделируемых условиях.

Также получены зависимости критериев плотности тока защиты $i(\text{А/м}^2)$ при смещении от стационарного потенциала на 100 мВ (критерий 1) (13); на 300 мВ (критерий 2), при потенциале -0,8 В (критерий 3); при потенциале -0,85 В (критерий 4); при потенциале -0,9 В (критерий 5) от величин факторов (рисунок 8). В первом случае полученное регрессионное уравнение является достоверным (уровень значимости составлял 0,008, что меньше статистического критерия Фишера со значением 0,05).

$$i(\text{смещение } 100 \text{ мВ}) = 0,48 \cdot x_1 + 0,29 \cdot x_2 - 6,4 \cdot x_4. \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что фактор x_2 (соленость) оказывает наименьшее влияние на плотность тока защиты в заданных моделью условиях. Значе-

ния коэффициентов уравнения (13) свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на плотность тока защиты оказывает приложенная нагрузка ($a_4 = 6,4$), на порядок меньше температура ($a_1 = 0,48$), наименьшее влияние оказывает соленость ($a_2 = 0,29$). Положительный знак перед коэффициентами a_1 и a_2 показывает, что увеличение данных двух факторов приводит к росту значения параметра, в нашем случае плотности тока защиты. Отрицательный знак перед коэффициентом a_4 приводит к уменьшению суммы вклада в значение плотности тока защиты при увеличении механической нагрузки.

При увеличении значений факторов, приводящих к усилению степени агрессивности среды, таких как температура и соленость, происходит увеличение значения критерия плотности тока защиты согласно уравнению (13). Это можно объяснить следующим образом. Скорость коррозии возрастает при увеличении солености и температуры, соответственно ток катодной защиты должен быть также увеличен.

При оценке плотности катодного тока следует рассматривать действие всех трех факторов вместе, не применяя их выборочно. Кроме того, следует учитывать тот факт, что представленные критерии плотности тока могут иметь максимальные значения по той причине, что эксперимент и расчеты производились для оголенной, не изолированной стали.

В таблице 4 представлены критерии плотности тока для различных условий эксплуатации в соответствии с ISO 15589-2 – первые три столбца и расчетные плотности тока (последние два столбца) для следующих условий: для оголенной поверхности при температурах столбца 2, солености 30 г/л, наличии нагрузки и сопротивлении изоляционного покрытия, равном $5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$. Изоляционное покрытие, соответствующее состоянию “Совершенно разрушено/отсутствует” характеризуется цифрой меньше $5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

Таблица 4 – Критерии плотности тока для экстремальных условий по ISO 15589-2:2012 и расчетные плотности тока

Плотности тока для экстремальных условий					Расчетные плотности тока	
Глубина моря, м	Температура морской воды, °С	Плотность тока, $\text{мА}/\text{м}^2$	Соленость	Нагрузка	Плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$ (оголенная поверхность)	Плотность тока, $\text{мкА}/\text{м}^2$ (поверхность с покрытием, сопротивление покрытия $3 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ – Состояние покрытия «Отличное»)
До 500	От 10 до 12	90	Не указана	Не указана	От 7,1 до 8,06	118-134
Все глубины	2	380	Не указана	Не указана	3,26	54
До 500	От 12 до 18	90	Не указана	Не указана	От 8,06 до 10,94	134-182
До 1500	От -1 до 4	300	Не указана	Не указана	От 1,82 до 4,22	30-70

Используя формулу (14) рассчитана плотность тока ($\text{мкА}/\text{м}^2$) для поверхности с покрытием сопротивлением $1 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

$$J_s = 0,3 \cdot 10^6 / r_u, \quad (14)$$

где J_s – плотность тока, мкА/м², r_u – сопротивление изоляционного покрытия, Ом·м².

Статистическая обработка данных влияния факторов на плотности тока, соответствующие критериям потенциала 2 - 5 (см. выше) показала, что полученные регрессионные уравнения не являются значимыми по критерию Фишера. Несмотря на это токи по критериям 1-5 (смещение на 100, 300 мВ, потенциалы минус 800, 850 мВ) коррелируют между собой с коэффициентами корреляции от 0,8 до 0,96.

На основе разработанной модели (13) предложено уточнение параметра плотности тока защиты (критерий 1) для оголенной поверхности, с формированием региональной критериальной оценки для подлежащих защите действующих и проектируемых морских нефтегазопроводных сооружений группы компании Газпром (Балтийское море, Охотское море, Карское море), с учетом температуры, солёности, скорости течения и физической нагрузки (таблица 5). Так же приведены скорости коррозии.

Таблица 5 – Критерии плотности тока для различных морей

Название моря	Средняя температура воды, °С	Средняя солёность воды, г/л	Средняя скорость течения, м/с	Физическая нагрузка до предела упругой деформации, %	Скорость коррозии без защиты, мм/год	Необходимая плотность тока защиты со смещением потенциала защиты на 100 милливольт относительно стационарного, А/м ²
Балтийское море	Зима: 2 °С	7	1,29	0	0,45	2,22-3,76
Карское море (Байдарацкая губа)	Лето: 8 °С	26	1,5	100	0,44	4,21-5,75
Охотское море	Лето: 6 °С	30	0,9	50	0,42	7,32-8,86

По результатам исследований электрохимических свойств стали в движущихся средах при исследовании четырех значимых факторов можно сделать выводы:

- выявлена значимость факторов, влияющих на скорость коррозии, стационарный потенциал и потенциал коррозии малоуглеродистой трубной стали в модельной морской воде;
- сконструирована и опробована установка для исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах с одновременным наложением нагрузки (в области упругой деформации) на рабочий электрод;

- получены результаты, свидетельствующие об интенсификации протекания коррозионных процессов при максимальном значении фактора скорости движения модельной морской воды при прочих равных условиях;

- напряженное состояние малоуглеродистой трубной стали приводит к разблагораживанию потенциала коррозии, интенсифицируя протекание коррозионных процессов на поверхности стали и увеличению скорости коррозии в смоделированных морских условиях;

- существует прямая связь между плотностями тока по критериям 1-5, что характеризуется высокой (0,7 – 0,9) и весьма высокой (0,9 – 0,99) теснотой связи по шкале Чеддока.

В таблице 6 представлены обобщенные данные для рабочих электродов, расположенных вдоль и поперек движения потока электролита.

Таблица 6 – Скорость коррозии, стационарный потенциал, критерии электрохимической защиты стали в морской воде и факторы, оказывающие на них влияние

	Плоский электрод			Электрод в толще раствора			
	Температура, °C	Концентрация NaCl, %	Скорость потока, м/с	Температура, °C	Концентрация NaCl, %	Скорость потока, м/с	Нагрузка
K, мм/год	↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↓↓↓	↓	↑↑↑↑	↑↑↑
E _{стац} , мВ	↓↓	↓	НЕ ЗНАЧИМ	↑	↓	↓↓↓	↓↓↓↓
i ⁻¹⁰⁰	↑↑	↑↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑	НЕ ЗНАЧИМ	↓↓↓
<p>Примечание Количество стрелок указывает на степень влияния фактора на результирующий признак, а направление – на увеличение и уменьшение. Красный цвет – увеличение, синий – уменьшение. Утолщенные границы справа и слева показывают влияние в одном и том же направлении.</p>							

Анализ таблицы 6 позволяет сделать следующие заключения:

- в случае рассмотрения разных электродов общим является значительное влияние скорости потока смоделированной морской воды на скорость коррозии (при увеличении скорости потока скорость коррозии возрастает);

- общим является влияние концентрации соли на стационарный потенциал (при увеличении концентрации стационарный потенциал смещается в отрицательную сторону, при этом сталь становится более активной в коррозионном отношении);

- на токовый критерий защиты при смещении потенциала на 100 мВ в отрицательную сторону в обоих случаях влияют и температура и концентрация соли.

В четвертой главе представлены положения работы, вошедшие в рекомендации для электрохимической защиты морских нефтегазопроводных систем ПАО «Газпром». В такие документы, как: “Р Газпром 9.2-026-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты морских трубопроводов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-032-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты портовых сооружений ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-034-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты подводных добычных комплексов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-033-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты морских платформ ОАО «Газпром»” были включены основные критериальные оценки защищенности морских объектов. Так, основной критерий защиты всего сооружения регламентируется величиной защитного потенциала и должен составлять минус 0,8 В, а максимальный минус 1,1 В по хлорсеребряному электроду. Другим важнейшим критерием защиты, является плотность наложенного тока. Защищенность морских трубопроводов, в том числе обетонированных, можно обеспечить путем смещения потенциала сооружения на 100 мВ в отрицательную сторону относительно потенциала свободной коррозии. При проектировании систем катодной защиты морских нефтегазовых систем необходимо учитывать информацию о наличии изоляционного и типе утяжеляющего покрытия, о солености морской воды, температуре, скоростях течений и других важных факторах, оказывающих влияние на безаварийную работоспособность сооружения.

В рекомендации: “Р Газпром 9.4-037-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга морских трубопроводов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-037-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга портовых сооружений ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-040-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга подводных добычных комплексов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.5-053-2016 Оборудование и технические средства для комплексного дистанционного мониторинга морских участков трубопроводов большего диаметра. Основные технические требования.” были включены сведения о том, что на подводных нефтегазопроводных объектах необходимо удаленно контролировать состояние системы морского ЭХЗ. Для этого возможно интегрировать в обетонированные и необетонированные морские объекты датчики скорости коррозии, потенциала, плотности тока, агрессивности среды и другое измерительное оборудование, данные с которых могут быть переданы на сервер оператора. На основе указанных в документах технических решений в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» был разработан патент на комплекс дистанционного коррозионного мониторинга подводных трубопроводов (Пат. RU 2625696 С1, С23F 13/22 (2006.01)).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. По результатам стендовых исследований на экспериментальной установке по измерению скорости коррозии в движущихся средах выявлено, что наиболее значимыми факторами, влияющими на защищенность от коррозии

морских сооружений, являются: температура, скорость течения и соленость раствора.

2. Исследование электрохимических свойств трубной стали X70 (K60), расположенной при проведении эксперимента вдоль движения среды при совместном влиянии трех значимых факторов показало, что происходит интенсификация протекания коррозионных процессов при максимальном значении фактора скорости движения электролита в установке при прочих равных условиях. Увеличение температуры и солености раствора приводят к смещению величины потенциала в отрицательную сторону, при этом поверхность стали становится более активной в коррозионном отношении. Для потенциала защиты со смещением 100 милливольт от естественного потенциала оказываются значимыми два фактора (температура и соленость), а для потенциала защиты со смещением 300 милливольт значима только температура. В случае критериев токов защиты при смещении соответствующих им потенциалов E-100 и E-300 все три фактора оказываются значимыми, при этом в обоих случаях самым весомым фактором является соленость, затем идет скорость течения, менее значимым фактором является температура. Из представленной совокупности данных, полученных при помощи созданной стендовой установки и проведенного регрессионного анализа, установлено влияние всех трех факторов на электрохимические процессы, протекающие на трубных сталях в условиях, максимально приближенных к морским средам.

3. Сконструирована и опробована установка для исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах с одновременным воздействием нагрузки (в области упругой деформации) на рабочий электрод, расположенный поперек движения потока электролита. Выявлена значимость факторов, влияющих на скорость коррозии, стационарный потенциал и потенциал коррозии малоуглеродистых трубных сталей в модельной морской воде. Получены результаты, свидетельствующие об интенсификации протекания коррозионных процессов при максимальном значении фактора скорости движения среды при прочих равных условиях. Напряженное состояние малоуглеродистых сталей приводит к разблагораживанию потенциала коррозии, интенсифицируя протекание коррозионных процессов на стальной поверхности и увеличению скорости коррозии. Выявлена связь между значениями критериев плотностей защитного тока, характеризуемой высокой и весьма высокой теснотой связи по шкале Чеддока.

4. Совместный анализ особенностей различного расположения рабочей стальной поверхности (вдоль и поперек движения электролита) выявило весомое влияние скорости потока на скорость коррозии (при увеличении скорости потока скорость коррозии возрастает). Кроме того, общим является также влияние степени концентрации соли на величину стационарного потенциала (при увеличении концентрации стационарный потенциал смещается в отрицательную сторону, при этом сталь становится более активной в коррозионном отношении). На значение плотности тока защиты при смещении потенциала на 100 мВ в отрицательную сторону (критерий 1) в обоих случаях влияют и температура и концентрация соли.

5. Основные результаты диссертационной работы были включены в Р Газпром 9.2-026-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты морских трубопроводов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-032-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты портовых сооружений ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-034-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты подводных добычных комплексов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.2-033-2014 Защита от коррозии. Руководство по организации электрохимической защиты морских платформ ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-037-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга морских трубопроводов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-037-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга портовых сооружений ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.4-040-2014 Защита от коррозии. Технические требования к системам коррозионного мониторинга подводных добычных комплексов ОАО «Газпром»; Р Газпром 9.5-053-2016 Оборудование и технические средства для комплексного дистанционного мониторинга морских участков трубопроводов большего диаметра. Основные технические требования.

6. Трубопроводы, выполненные из труб с утяжеляющими покрытиями в металлополимерной оболочке и уложенные в море, могут быть защищены наложенным током катодной защиты или протекторной защитой через не изолированные торцевые поверхности утяжеляющего покрытия на каждой трубе. Контроль защищённости металла трубы под металлополимерной оболочкой и утяжеляющим покрытием может быть реализован с применением датчиков потенциала, электродов сравнения и датчиков скорости коррозии, установленных в утяжеляющем покрытии под металлополимерной оболочкой. В условиях катодной поляризации модельного участка трубопровода с утяжеляющим покрытием в металлополимерной оболочке подтверждена возможность обеспечения электрохимической защиты дефектов основного полимерного покрытия.

Список публикаций по теме диссертации

1. Пат. RU 111298 U1, G01N 27/26 (2006.01). Установка для исследования электрохимических процессов / Д.С. Сирота, А.Н. Улихин, С.Н. Ашарин, Н.К. Шамшетдинова, Н.Н. Глазов, Д.Н. Запевалов (Россия). - № 2011130069/28; Заявлено 19.07.2011; Оpubл. 10.12.2011 Бюл. №34.

2. Пат. RU 2625696 C1, C23F 13/22 (2006.01). Комплекс дистанционного коррозионного мониторинга подводных трубопроводов / Запевалов Дмитрий Николаевич, Глазов Николай Николаевич, Хакамов Марат Фаатович, Копьев Игорь Юрьевич, Сирота Дмитрий Сергеевич, Пушкарев Александр Михайлович, Ашарин Сергей Николаевич (Россия). - № 2016118248; Заявлено 11.05.2016; Оpubл. 18.07.2017 Бюл. №20.

3. Пат. RU 95404 U1, G01N 27/26 (2006.01). Ячейка для исследования электрохимических процессов / Д.С. Сирота, А.Н. Улихин, И.Ю. Копьев, А.М. Пушкарев, С.Н. Ашарин, Н.Н. Глазов, Д.Н. Запевалов (Россия). - № 2010103957/22; Заявлено 05.02.2010; Оpubл. 27.06.2010, Бюл. №18.

4. Ашарин С.Н. Установка для исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах / С.Н. Ашарин // Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО “Газпром ВНИИГАЗ”. –2012. – С.101–104.

5. Ашарин С.Н. Установка для исследования электрохимических свойств стали в движущихся средах и методика проведения эксперимента / С.Н. Ашарин, Д.С. Сирота, Д.Н. Запевалов // Сборник тезисов докладов IV Международной конференции “ Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток «ROOGD-2012» (10-11 октября 2012г.). – М.: ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, 2012. – С.53.

6. Ашарин С.Н., Сирота Д.С., Запевалов Д.Н., Комягин А.Ф., Улихин А.Н. Оценка воздействия факторов, влияющих на скорость коррозии в морской воде, при помощи специализированной исследовательской установки // Практика противокоррозионной защиты. – 2013. – №4. – С. 6 - 9.

7. Ашарин С.Н. Коррозионные факторы морской среды и моделирование электрохимического воздействия на сталь в лабораторных условиях / С.Н. Ашарин // Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО “Газпром ВНИИГАЗ”. –2013. – С.103–113.

8. Ашарин С.Н. Оценка воздействия факторов, влияющих на скорость коррозии в морской воде при помощи специализированной исследовательской установки / С.Н.Ашарин, Д.С.Сирота, Д.Н. Запевалов // Сборник тезисов докладов Международной конференции “Противокоррозионная защита – ключ к энергетической и экологической безопасности”. – М.: РГУ, 2013. – С.49.

9. Улихин А.Н., Запевалов Д.Н., Глазов Н.Н., Сирота Д.С., Ашарин С.Н. Экспериментальная проверка методов контроля коррозионного состояния и состояния защитных покрытий трубопроводов с многослойными и утяжеляющими покрытиями // Коррозия «Территории «НЕФТЕГАЗ»– 2015. – №3. – С. 78-82

10. Ашарин С.Н. Разработка методов контроля коррозионного состояния и состояния защитных покрытий трубопроводов с многослойными и утяжеляющими покрытиями // Практика противокоррозионной защиты. – 2016. – №1. – С. 47 – 54.

11. Ашарин С.Н. Оценка степени влияния свойств электролита и механического состояния Ст 3 на ее коррозионное поведение в диапазоне концентраций раствора NaCl от 0,3 до 3% / С.Н. Ашарин, Д.С. Сирота, А.Н. Улихин, Д.Н. Запевалов, Н.К. Шамшетдинова // Сборник тезисов докладов III международной конференции “Фундаментальные аспекты коррозионного материаловедения и защиты металлов от коррозии” (18-20 апреля 2016г.). – М.: ИФХ РАН, 2016. – С.18.

12. Ашарин С.Н., Сирота Д.С., Улихин А.Н., Запевалов Д.Н., Глазов Н.Н. Контроль коррозионного состояния и состояния защитных покрытий трубопроводов с многослойными и утяжеляющими покрытиями // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2016. - №2. – С. 5-9.

13. Ашарин С.Н., Сирота Д.С., Улихин А.Н., Запевалов Д.Н., Шамшетдинова Н.К. Оценка степени влияния свойств электролита и механического состояния Ст 3 на ее коррозионное поведение в диапазоне концентрации раствора

NaCl от 0,3 до 3% // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2016. - №3. – С. 21-24.

14. Ашарин С.Н., Сирота Д.С., Улихин А.Н., Запевалов Д.Н., Шамшетдинова Н.К. Оценка степени влияния свойств электролита и механического состояния Ст 3 на ее коррозионное поведение в растворах NaCl // Практика противокоррозионной защиты. – 2016. – №3. – С. 41 – 51.

15. Ашарин С.Н. Моделирование условий коррозионного воздействия морской среды на трубопроводную сталь / С.Н. Ашарин, Д.С. Сирота, А.Н. Улихин, Д.Н. Запевалов.// Сборник тезисов докладов VI Международной научно-технической конференции “Газотранспортные системы: настоящее и будущее «GTS-2015»”. – М.: ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, 2015. – С.159.

16. Ашарин С.Н., Сирота Д.С., Улихин А.Н., Запевалов Д.Н., Шамшетдинова Н.К. Оценка степени влияния свойств электролита и механического состояния Ст 3 на потенциал и плотность тока электрохимической защиты в диапазоне концентраций раствора NaCl от 0,3 до 3% // Практика противокоррозионной защиты. – 2016. – №4. – С. 37 – 40.

Подписано к печати « » _____ 2018 г.

Заказ №

Тираж 100 экз.

1 уч. – изд.л, ф-т 60x84/16

Отпечатано в ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

По адресу: 142717, Московская область,

Ленинский район,

сельское поселение Развилковское, пос. Развилка,

Проектируемый проезд № 5537, владение 15, строение 1,

ООО «Газпром ВНИИГАЗ».