

На правах рукописи

Жуйков Илья Владиславович



**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ
СТОЙКОСТИ К ЯЗВЕННОЙ КОРРОЗИИ ТРУБНЫХ
СТАЛЕЙ ПРОМЫСЛОВЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Болобов Виктор Иванович

Официальные оппоненты:

Атрошенко Светлана Алексеевна

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, лаборатория физики разрушения, ведущий научный сотрудник;

Бурков Петр Владимирович

доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2026 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Нефть играет ключевую роль в функционировании современной мировой экономики, выступая в качестве основного сырьевого ресурса для производства синтетических материалов и моторных топлив. Углеводородное сырье сохраняет стратегическое значение в структуре топливно-энергетического баланса, а продукты нефтепереработки широко применяются в различных отраслях промышленности.

Вместе с тем процессы нефтепользования – от геологоразведки и добычи до утилизации отходов – неизбежно сопровождаются техногенным воздействием на окружающую среду. Разливы нефти, эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу, водные объекты и почву обуславливают разрушение экосистем и создают риски для здоровья населения.

Отмечается, что наиболее уязвимыми в процессе эксплуатации объектами нефтепользования являются промышленные нефтепроводы, предназначенные для транспортировки неочищенных нефтепродуктов с высоким содержанием коррозионно-активных примесей.

Промысловые нефтепроводы относятся к категории опасных промышленных объектов. Доля аварийных ситуаций на этих объектах в 2020 году достигла 50 % от общего количества аварий, связанных с коррозией в добывающих отраслях России. В результате таких аварий происходит не только загрязнение окружающей среды, но и снижение добычи нефти, повышение затрат на капитальный ремонт нефтепроводов и природоохранные мероприятия. При этом отмечается, что в большинстве случаев причиной аварий промышленных нефтепроводов является именно внутренняя коррозия их стенки. В результате присутствия в рабочей среде промышленных нефтепроводов анионов-активаторов внутренняя поверхность стенки трубы из углеродистых сталей как основных материалов промышленных нефтепроводов подвергается не только общей, но и язвенной коррозии.

Для предотвращения возникновения язвенной коррозии промышленных нефтепроводов в настоящее время разработан ряд

методов защиты, таких как ингибирование, применение труб с внутренним покрытием и другие конструктивные и технологические способы, которые, как показывает практика, зачастую являются не эффективными и/или экономически не выгодными. В таких случаях предотвращение аварий от последствий язвенной коррозии на промысловых нефтепроводах осуществляется периодической заменой наиболее подверженных коррозии стальных труб на новые, которые через некоторое время опять требуют замены. Поэтому тема диссертации, посвященная разработке научно-обоснованного метода исследования закономерностей процесса язвенной коррозии трубных сталей в условиях работы промысловых нефтепроводов для последующего ранжирования этих материалов по стойкости к данному виду коррозии, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

В работах Розенфельда И.Л., Колотыркина Я.М., Томашова Н.Д., Улига Г.Г., Wranglen G., Guo P. и др. установлены основные этапы и закономерности локальной коррозии, а также причины возникновения и развития коррозионных язв на поверхности стальных конструкций в ненапряженном состоянии.

В работах Гутмана Э.М., Зайнуллина Р.С., Абдулина И.Г., Макаренко В.Д., Zhang Z. и др. предлагается механизм влияния механических напряжений на интенсивность общей коррозии, а также описываются некоторые особенности коррозии труб, перекачивающих нефть на промыслах.

В то же время сведения о кинетике процесса язвенной коррозии углеродистых трубных сталей в условиях работы промысловых нефтепроводов, как и о влиянии на интенсивность роста язв напряженного состояния металла, весьма ограничены. Не разработаны в должной мере методы исследования интенсивности язвенной коррозии в условиях эксплуатации промысловых нефтепроводов, в частности, в присутствии механических напряжений, позволяющие по результатам лабораторных испытаний ранжировать трубные стали по стойкости к язвенной коррозии в условиях эксплуатации промысловых нефтепроводов с выбором наиболее стойких.

Объект исследования – процесс язвенной коррозии трубных сталей в условиях работы промышленных нефтепроводов.

Предмет исследования – метод исследования язвенной коррозии феррито-перлитных трубных сталей, используемых в качестве материала промышленных нефтепроводов.

Цель работы – повышение срока службы труб промышленных нефтепроводов путем выбора сталей наиболее стойких к язвенной коррозии.

Идея работы – при определении срока службы промышленного нефтепровода необходимо учитывать кинетические параметры процесса язвенной коррозии используемой трубной стали, установление которых возможно по предлагаемому методу.

Задачи исследования:

1. На основе обобщения теоретических и экспериментальных исследований установить факторы, определяющие возникновение и интенсивность язвенной коррозии в условиях работы промышленных нефтепроводов.

2. Разработать метод лабораторных коррозионных испытаний трубных сталей в условиях, имитирующих комплексное воздействие на трубопровод факторов, способствующих язвенной коррозии.

3. С использованием разработанного метода исследовать кинетические закономерности процесса язвенной коррозии некоторых марок трубных сталей с их ранжированием по коррозионной стойкости.

4. С использованием установленных кинетических параметров процесса язвенной коррозии исследованных трубных сталей рассчитать срок службы промышленного нефтепровода, изготовленного из анализируемых материалов.

Научная новизна

1. Выявлены основные факторы, обуславливающие процесс язвенной коррозии промышленных нефтепроводов, а именно: расслоение потока водонефтяной эмульсии, насыщение пластовой воды хлор-ионом, присутствие в потоке механических частиц, насыщение среды кислородом и повышенный уровень напряженно-деформированного состояния трубы, которые учтены при разработке научно-обоснованного метода коррозионных испытаний трубных

сталей, позволяющего в лабораторных условиях исследовать влияние химического состава и напряженного состояния стали на ее стойкость к язвенной коррозии.

2. Установлены вид и параметры кинетического закона процесса язвенной коррозии феррито-перлитных трубных сталей в условиях, имитирующих условия работы промышленных нефтепроводов.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение: п. 5. «Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды», п. 6. «Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. С использованием разработанного метода обнаружено, что процесс язвенной коррозии феррито-перлитных трубных сталей протекает в две стадии, первая из которых соответствует зарождению язвы, а вторая – устоявшейся стадии процесса, в течение которого приращение глубины язвы во времени протекает с постоянной скоростью, зависящей от химического состава стали и уровня ее напряженного состояния.

2. Установлено, что скорость язвенной коррозии в ненапряженном состоянии и значение механохимического коэффициента стали 09Г2С до 1,7 и 1,5 раз соответственно ниже величины этих показателей сталей Ст3, 08пс, 20кп, что свидетельствует о благоприятном влиянии на стойкость стали 09Г2С к язвенной коррозии в условиях эксплуатации промышленных нефтепроводов введения в ее состав повышенного количества кремния и марганца относительно других анализируемых сталей.

3. Разработан научно-обоснованный метод коррозионных испытаний трубных сталей, позволяющий в лабораторных условиях

исследовать влияние химического состава материала на его стойкость к язвенной коррозии под напряжением с последующим ранжированием сталей по стойкости к язвенной коррозии в условиях работы промышленных нефтепроводов.

4. Результаты диссертационной работы использованы на предприятии ООО «НТЦ «РусЭкспертПрогресс» (акт внедрения от 24.12.2025), выполняющем работы по технической диагностике и неразрушающему контролю промышленных и магистральных нефтепроводов с оценкой коррозионной стойкости сталей.

5. Результаты диссертационной работы подтверждены патентом на изобретение № 2848683 «Способ оценки стойкости трубопроводных углеродистых сталей к язвенной коррозии под напряжением» от 21.10.2025, а также патентом на полезную модель № 236969 «Лабораторное устройство для выдержки напряженно-деформированных образцов трубопроводных сталей в коррозионной среде» от 02.09.2025.

Методология и методы исследования. Проведение научного исследования осуществлялось на основании комплексного подхода, связанного с детальным анализом теоретических сведений о процессе язвенной коррозии промышленных нефтепроводов, а также с экспериментальным изучением закономерностей процесса язвенной коррозии трубных сталей для определения их коррозионной стойкости в условиях работы промышленных нефтепроводов.

Экспериментальные исследования по оценке стойкости к язвенной коррозии образцов из трубных сталей проводились при помощи следующих методов и оборудования: формирование в образцах механических напряжений с помощью струбины и индикатора часового типа, проведение коррозионных испытаний с использованием запатентованного лабораторного устройства, оптические измерения глубины коррозионных язв с помощью металлографического микроскопа Leica DMIL HC.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод лабораторных испытаний трубных сталей, имитирующий комплексное воздействие на материал факторов, определяющих возникновение и интенсивность язвенного поражения промышленных нефтепроводов, позволяет исследовать кинетические

закономерности указанного процесса и ранжировать стали по их стойкости к язвенной коррозии.

2. Глубина язвенного поражения h_i промышленного нефтепровода из феррито-перлитной трубной стали определяется скоростью анодного растворения использованного материала, зависящей от химического состава стали и уровня растягивающих напряжений σ_{pi} в трубе, и возрастает с увеличением времени эксплуатации трубопровода t_i в соответствии с зависимостью:

$$h_i = (k_0 + K_\sigma \cdot \sigma_{pi}) \cdot t_i,$$

где k_0 , K_σ – скорость приращения глубины язвы в ненапряженном металле и механохимический коэффициент, характерные для каждой феррито-перлитной трубной стали.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается соответствием результатам общепризнанных исследований в области коррозии и коррозионного разрушения нефтепроводов, достаточным объёмом экспериментальных исследований на сертифицированном и поверенном оборудовании, а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациях в рецензируемых изданиях.

Апробация результатов диссертации проводилась на 4 научно-практических мероприятиях, в том числе на 3 международных: Международном симпозиуме «Нанозифика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 22-23 ноября 2023 г.); Вузовской конференции «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, 21-25 октября 2024 г.); Международном симпозиуме «Нанозифика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 20-21 ноября 2024 г.); XXIV Международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности» (г. Екатеринбург, 2-3 апреля 2026 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели, формулировке задач и разработке методики исследования, проведении анализа основных теоретических представлений о процессе коррозионного разрушения промышленных нефтепроводов, проектировании и изготовлении лабораторного устройства,

разработке метода коррозионных испытаний в условиях, имитирующих язвенное поражение стенки промыслового нефтепровода, проведении экспериментальных и теоретических исследований процесса язвенной коррозии промысловых нефтепроводов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 патента, из них 1 – на изобретение и 1 – на полезную модель.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 164 наименования, и 3 приложений. Диссертация изложена на 121 странице машинописного текста, содержит 28 рисунков и 3 таблицы.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю профессору Болобову В.И. и старшему научному сотруднику Попову Г.Г. за помощь и наставничество при подготовке диссертации, а также сотрудникам кафедры материаловедения и технологии художественных изделий Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за ценные советы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе освещены современные проблемы эксплуатации промысловых нефтепроводов, проведен анализ аварийности трубопроводов на объектах нефтедобычи и рассмотрены основные существующие методы защиты промысловых нефтепроводов от язвенной коррозии.

Во второй главе рассмотрены основные закономерности процесса язвенной коррозии углеродистых и низколегированных сталей. После анализа факторов, влияющих на возникновение и интенсивность процесса язвенной коррозии в условиях эксплуатации промышленных нефтепроводов, делается заключение, что интенсивное язвенное поражение труб промышленных нефтепроводов наблюдается при одновременном выполнении таких условий, как расслоение водонефтяной эмульсии, наличие в ее составе хлор-ионов, обогащение эмульсии кислородом, нахождение металла стенки трубы в напряженно-деформированном состоянии, периодическое удаление продуктов коррозии в результате абразивного воздействия твердых частиц.

В третьей главе с учетом установленных факторов разрабатывается метод лабораторных испытаний, позволяющий исследовать кинетику процесса язвенной коррозии материалов стальных промышленных нефтепроводов. Испытания проводятся в водной хлорсодержащей среде, непрерывно насыщаемой кислородом, на образцах, рабочие зоны которых находятся под действием растягивающих напряжений различной интенсивности, при периодическом удалении образующихся продуктов коррозии.

Четвертая глава посвящена применению разработанного метода для изучения стойкости к язвенной коррозии материалов промышленных нефтепроводов.

В заключении отражены основные выводы по результатам работы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Метод лабораторных испытаний трубных сталей, имитирующий комплексное воздействие на материал факторов, определяющих возникновение и интенсивность язвенного поражения промышленных нефтепроводов, позволяет исследовать кинетические закономерности указанного процесса и ранжировать стали по их стойкости к язвенной коррозии.

Объектом исследования по предлагаемому методу являются образцы в виде пластин 150х15х3 мм, вырезанные из проката трубных сталей после шлифовки и полировки.

На поверхности одной из широких сторон пластины на расстоянии 20 мм, 35 мм, 50 мм и 75 мм от ее конца выделяются 4 рабочие зоны шириной 2 мм для формирования на них заданных растягивающих напряжений σ_{pi} . Поверхность пластин рядом с указанными зонами покрывается защитным лаком, что позволяет при проведении последующих оптических измерений использовать точки на защищенной поверхности металла в качестве реперных.

Образец 1 (рисунок 1) рабочей поверхностью кверху помещается в струбцину 2, где подвергается трехточечному статическому изгибу. Для предотвращения возникновения возможной контактной коррозии, вкладыш 3, используемый для изгиба пластин, изготавливается из полимерного материала. Исходя из предела текучести σ_T испытываемой стали, образец с использованием индикатора часового типа 4 изгибается в струбцине до заданной стрелы прогиба h (1):

$$h = \frac{\sigma_p \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot b}, \quad (1)$$

где L – расстояние между опорами (120 мм); b – толщина образца (3 мм); E – модуль Юнга (~ 200 ГПа).

В результате достигается стрела прогиба, при которой металл приповерхностного слоя в центральной, наиболее выпуклой зоне №1 образца находится под действием растягивающего напряжения $\sigma_{p1} = 0,7\sigma_T$ соответствующей стали как напряжения, характерного для тяжелых условий эксплуатации промысловых нефтепроводов. Исходя из существующего линейного распределения напряжений по длине образца, напряжения σ_{p4} , σ_{p3} , σ_{p2} в зонах №№ 4, 3, 2 составляют 0,06; 0,24; 0,42 σ_T анализируемой стали.

Находящиеся в напряженном состоянии образцы вместе со струбцинами в боковом положении погружаются в емкость (рисунок 2) с коррозионной средой – 3,5% водным раствором NaCl как модельной средой наиболее часто используемой для имитации минерализованной пластовой воды, где выдерживаются заданное время t_i . На всем протяжении испытаний между образцами в районе их рабочих зон подается воздух, что имитирует насыщение эмульсии в промысловом нефтепроводе кислородом.

После воздействия среды образцы извлекаются из струбцин и обрабатываются ластиком для удаления слоя защитного лака и

продуктов коррозии. Образец устанавливается на столик металлографического микроскопа, где с помощью тонкой фокусировки определяется глубина h_i 5-и наиболее крупных коррозионных язв, образовавшихся на поверхности каждой его рабочей зоны, как разница ΔI между фокусным расстоянием до дна язвы ($I_{я}$) и находящейся рядом реперной точки (I_p) (рисунок 3).

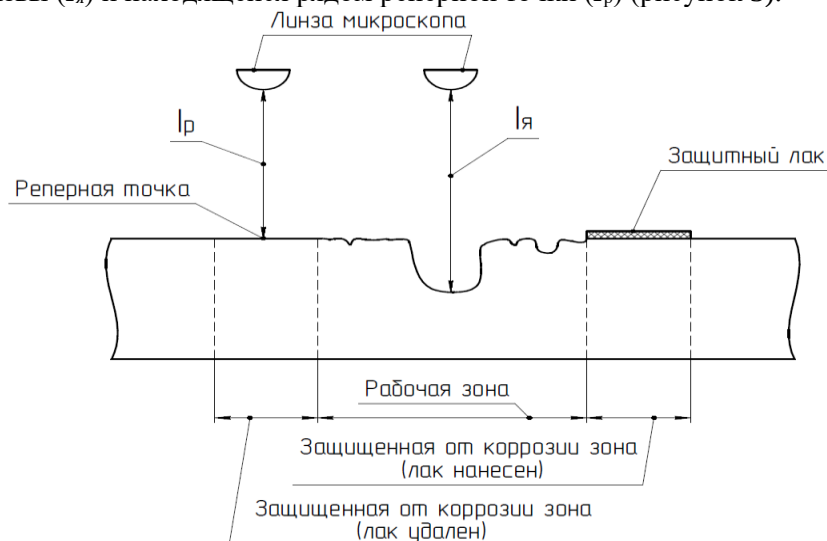


Рисунок 3 – Схема определения глубины коррозионной язвы

Затем поверхность образцов рядом с рабочими зонами повторно покрывается защитным лаком, образцы в струбцинах изгибаются до достижения тех же величин σ_{p1} , σ_{p2} , σ_{p3} , σ_{p4} и повторно вместе со струбцинами помещаются в емкость для последующего воздействия среды. По истечении заданного времени воздействия t_i осуществляется замер глубины h_i тех же язв. И так до заданного суммарного воздействия среды t_{Σ} .

Для каждой временной экспозиции t_i и каждой рабочей зоны образца рассчитывается среднее значение глубины h_{cp} 5-и анализируемых язв. Строится зависимость h_{cp} от времени воздействия t_i , которая аппроксимируется наиболее соответствующим кинетическим уравнением. С учетом напряжения σ_{pi} , соответствующего каждой зоне, строится зависимость

установленных кинетических параметров от величины σ_{pi} , из аппроксимации которой определяется значение механохимического коэффициента для данной стали. Из сопоставления значений кинетических параметров и механохимических коэффициентов, установленных для разных трубных сталей, осуществляется ранжировка этих материалов по стойкости к язвенной коррозии в условиях работы промысловых нефтепроводов.

Таким образом, первое защищаемое положение следует считать доказанным.

2. Глубина язвенного поражения h_i промыслового нефтепровода из феррито-перлитной трубной стали определяется скоростью анодного растворения использованного материала, зависящей от химического состава стали и уровня растягивающих напряжений σ_{pi} в трубе, и возрастает с увеличением времени эксплуатации трубопровода t_i в соответствии с зависимостью:

$$h_i = (k_0 + K_\sigma \cdot \sigma_{pi}) \cdot t_i,$$

где k_0 , K_σ – скорость приращения глубины язвы в ненапряженном металле и механохимический коэффициент, характерные для каждой феррито-перлитной трубной стали.

На примере феррито-перлитных трубных сталей Ст3, 08пс, 20кп, 09Г2С было показано, что в условиях проведения экспериментов все анализируемые стали действительно подвергаются язвенной коррозии, вид язв которой близок к имеющему место в промысловых нефтепроводах (рисунок 4). Установленную временную зависимость роста глубины язв иллюстрируют рисунки 5, 6.

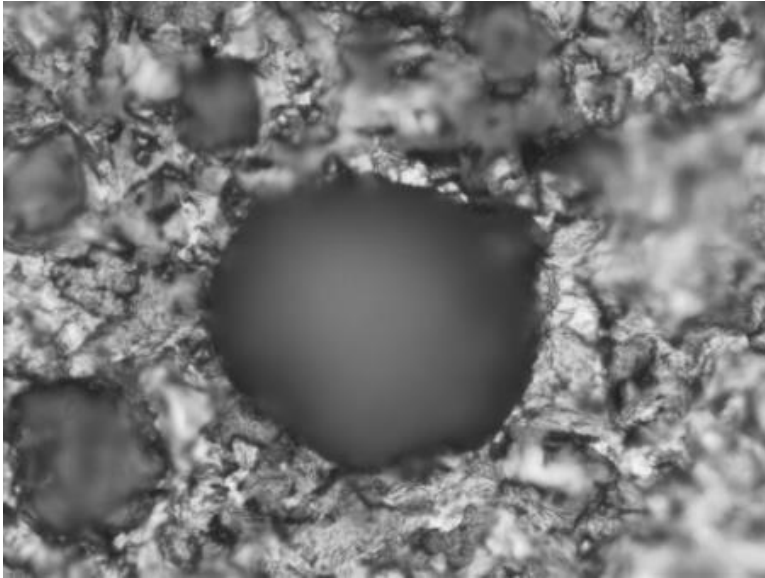


Рисунок 4 – Типичный вид язв, образующихся в процессе испытаний образцов трубных сталей

Как видно их хода кривых рисунков 5, 6 для всех сталей при всех анализируемых напряжениях σ_{pi} после сравнительно небольшого инкубационного периода (зона I, ~ 5 часов) наступает устоявшаяся стадия процесса (зона II), в течение которой глубина язв во времени прирастает по линейному уравнению (2):

$$h_{cp} = k_i \cdot t_i, \quad (2)$$

в котором коэффициент k_i представляет собой *скорость язвенной коррозии* соответствующей стали при данном растягивающем напряжении σ_{pi} .

Строились зависимости $k_i = f(\sigma_{pi})$ (рисунок 7), которые, как оказалось, удовлетворительно ($R^2 = 0,9976 - 0,9998$) аппроксимируются линейными уравнениями вида (3):

$$k_i = k_0 + K_\sigma \cdot \sigma_{pi}, \quad (3)$$

показатель k_0 которых, соответствующий $\sigma_{pi} = 0$, представляет собой *скорость язвенной коррозии данной стали в ненапряженном состоянии*, а параметр K_σ – *механохимический коэффициент*

возрастания скорости роста язвы с увеличением растягивающего напряжения в окружающем язву металле.

В таблице 1 приведены установленные значения k_i , k_0 , K_σ уравнений (2), (3) сталей. В скобках – значения указанных параметров, пересчитанные на обычно используемую в практике размерность мм/год.

Обнаруженная для второй стадии процесса независимость скорости роста язв от времени может быть объяснена совокупным действием последовательных процессов: коррозии активной поверхности в моменты выдержки, когда слой продуктов коррозии механически удален, и формированием внутри язв растворимых хлорсодержащих комплексов железа, подкисляющих раствор внутри язв и не препятствующих выходу катионов железа из металла дна и стенок язвы, которые выступают в качестве анодных участков в протекающей электрохимической реакции. В качестве катода в этой реакции выступает окружающий язву металл, на поверхности которого адсорбированный кислород принимает освобождающиеся электроны, превращаясь в ионы OH^- . Возможное объяснение влияния растягивающих напряжений на скорость роста язвы связано со снижением термодинамической стойкости металла в результате сообщения ему под действием механических напряжений добавочной энергии, о чем есть упоминание в литературе. Установленный факт зависимости скорости роста язвы от напряженного состояния металла свидетельствует о том, что электрохимическая реакция лимитируется скоростью прохождения именно анодного процесса.

Из данных таблицы 1 видно, что для стали 09Г2С скорость язвенной коррозии ненапряженной конструкции k_0 (2,4 мм/год) существенно ниже (до 1,7 раз) аналогичных параметров для сталей Ст3, 08пс, 20кп (3,33 – 4,12 мм/год). Отличается в меньшую сторону (до 1,5 раз) для этой стали и значение механохимического коэффициент K_σ : 0,039 мм/(год МПа) по сравнению с 0,045 – 0,059 мм/(год МПа) для остальных сталей. Указанные обстоятельства можно объяснить наличием относительно большего количества кремния и марганца в составе стали 09Г2С, благоприятным образом влияющих на коррозионную стойкость стали к язвенной коррозии

под напряжением. Такой вывод находится в соответствии с общепринятым мнением о предпочтительном использовании низколегированных сталей для промысловых нефтепроводов.

Расчетный анализ срока службы $t_{сл.}$ нефтепровода, изготовленного из анализируемых сталей, вышедшего из строя вследствие сквозного разрушения стенки трубы в результате язвенной коррозии, проводился на примере широко используемого его типоразмера 426x10 мм с максимальным рабочим давлением $P_p = 4,0$ МПа. Результаты расчета (2), (3), проведенные с использованием кинетических параметров k_0 , K_σ сталей из таблицы 1 при подстановке в (3) в качестве растягивающих напряжений σ_{pi} эквивалентных напряжений $\sigma_{экв}$ ($\sigma_\sigma = 112$ МПа) в стенке трубы, иллюстрирует рисунок 8.

Как видно из графика рисунка, при переходе материала трубы от углеродистых сталей ($t_{сл.Ст3}$, $t_{сл.08пс}$, $t_{сл.20кп}$) к низколегированной ($t_{сл.09Г2С}$) время до выхода трубопровода из строя вследствие сквозного язвенного поражения трубы возрастает с 12-14 до 18 месяцев. Можно отметить, что полученные в результате расчета сроки службы трубы находятся в соответствии с реальными сроками эксплуатации промысловых нефтепроводов, пораженных интенсивной язвенной коррозией.

Таким образом, второе положение, вынесенное на защиту, считается доказанным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи разработки научно-обоснованного метода исследования стойкости трубных сталей к язвенной коррозии в условиях работы промысловых нефтепроводов, что имеет существенное значение для обеспечения работоспособности оборудования нефтегазовой промышленности страны.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы.

1. В ходе анализа теоретических и экспериментальных исследований выявлены факторы, определяющие возникновение и интенсивность язвенной коррозии металла трубы в условиях работы промысловых нефтепроводов, а именно: расслоение водонефтяной

эмульсии, наличие в ее составе хлор-ионов, обогащение эмульсии кислородом, нахождение металла стенки трубы в напряженно-деформированном состоянии, периодическое удаление продуктов коррозии в результате абразивного воздействия твердых частиц.

2. Разработан метод лабораторных коррозионных испытаний трубных сталей в условиях, имитирующих комплексное воздействие на материал факторов, способствующих язвенному поражению промысловых нефтепроводов, позволяющий исследовать кинетику развития язвы и ранжировать трубные стали по стойкости к язвенной коррозии в условиях работы промысловых нефтепроводов с выбором наиболее стойких.

3. Результатами исследований, проведенных по разработанному методу, показано, что протекающий электрохимический процесс язвенного поражения феррито-перлитных трубных сталей в условиях работы промысловых нефтепроводов лимитируется скоростью анодного процесса растворения металла на дне язвы, которая постоянна во времени на устоявшейся стадии роста язв и зависит от химического состава стали и уровня напряженного состояния металла трубы.

4. Установлены значения кинетических параметров уравнения скорости роста язв и механохимических коэффициентов процесса язвенной коррозии феррито-перлитных трубных сталей марок Ст3, 20кп, 08пс, 09Г2С. При этом скорость язвенной коррозии в ненапряженном состоянии и механохимический коэффициент стали 09Г2С оказались до 1,7 и 1,5 раз соответственно ниже, чем для остальных марок сталей, что связано с повышенным содержанием в составе стали 09Г2С кремния и марганца, повышающих сопротивление материала язвенной коррозии.

5. Результатами расчетов, проведенных с использованием установленных кинетических параметров процесса язвенной коррозии трубных сталей, показано, что изготовление труб промысловых нефтепроводов из стали 09Г2С может повысить срок службы нефтепровода с 12-14 до 18 месяцев по сравнению с углеродистыми сталями Ст3, 08пс, 20кп.

Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования может быть связано с применением разработанного метода для

изучения влияния различных легирующих элементов на стойкость трубных сталей к язвенной коррозии с целью разработки коррозионностойких их составов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Болобов, В. И. К влиянию напряженного состояния трубы на интенсивность питтинговой коррозии промысловых нефтепроводов / В. И. Болобов, **И. В. Жуйков**, Г. Г. Попов // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 109-120. – DOI: 10.17122/ngdelo-2023-4-109-120;

2. Болобов, В. И. К влиянию растягивающих напряжений на интенсивность язвенной коррозии низкоуглеродистых трубных сталей / В. И. Болобов, **И. В. Жуйков**, Г. Г. Попов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2024. – Т. 2024, № 12. – С. 15-24. – DOI: 10.30987/2223-4608-2024-15-24.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Bolobov, V. Development of the Kinetic Equation of the Groove Corrosion Process for Predicting the Residual Life of Oil-Field Pipelines / V. Bolobov, G. Popov, **I. Zhuikov**, V. Zlotin // Energies. – 2023. – Vol. 16 (7067). – pp. 1-11. – DOI: 10.3390/en16207067;

4. Bolobov, V. Kinetic parameters of pitting corrosion process in oilfield pipeline materials / V. Bolobov, **I. Zhuikov**, G. Popov // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2026. – Vol. 39, No. 11. – pp. 2981-2989. – DOI: 10.5829/ije.2026.39.11b.23.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент № 2848683 Российская Федерация, МПК G01N 17/00 (2006.01); СПК G01N 17/006 (2025.05). Способ оценки стойкости трубопроводных углеродистых сталей к язвенной коррозии под напряжением. Заявка № 2025107759: заявл. 31.03.2025: опубл. 21.10.2025 / В.И. Болобов, **И.В. Жуйков**, Г.Г. Попов; заявитель/па-

тентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 15 с.

6. Патент № 236969 Российская Федерация, МПК G01N 17/00 (2006.01); СПК G01N 17/002 (2025.01). Лабораторное устройство для выдержки напряженно-деформированных образцов трубопроводных сталей в коррозионной среде. Заявка № 2025107763: заявл. 31.03.2025; опубл. 02.09.2025 / В.И. Болобов, **И.В. Жуйков**, Г.Г. Попов; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет Екатерины II». – 8 с.

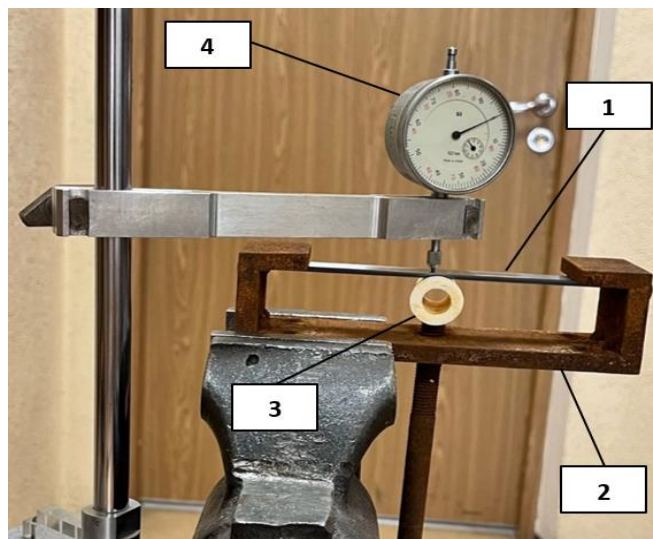


Рисунок 1 – Устройство для придания необходимых напряжений σ_{pi} рабочим зонам образца



Рисунок 2 – Вид сверху струбцин с образцами в емкости с коррозионной средой в исходном состоянии до продувки (а) и с продувкой (б) воздухом в процессе испытаний

Таблица 1 – Кинетические параметры язвенной коррозии анализируемых трубных сталей на устойчивейшей стадии процесса

Марка стали	σ_{pi} , МПа	k_i , мкм/ч (мм/год)	k_0 , мкм/ч (мм/год)	K_σ , мкм/(ч·МПа) (мм/(год·МПа))
Ст3	18,8	0,56 (4,91)	0,47 (4,12)	0,0054 (0,047)
	75,1	0,88 (7,71)		
	131,5	1,20 (10,51)		
	219,1	1,65 (14,45)		
08пс	12,5	0,48 (4,20)	0,40 (3,50)	0,0067 (0,059)
	49,9	0,74 (6,48)		
	87,4	0,99 (8,67)		
	145,6	1,37 (12,00)		
20кп	17,1	0,46 (4,03)	0,38 (3,33)	0,0051 (0,045)
	68,4	0,75 (6,57)		
	119,7	1,00 (8,76)		
	199,5	1,40 (12,26)		
09Г2С	18,0	0,35 (3,07)	0,27 (2,37)	0,0044 (0,039)
	72,0	0,59 (5,17)		
	126,0	0,81 (7,10)		
	210,0	1,20 (10,51)		

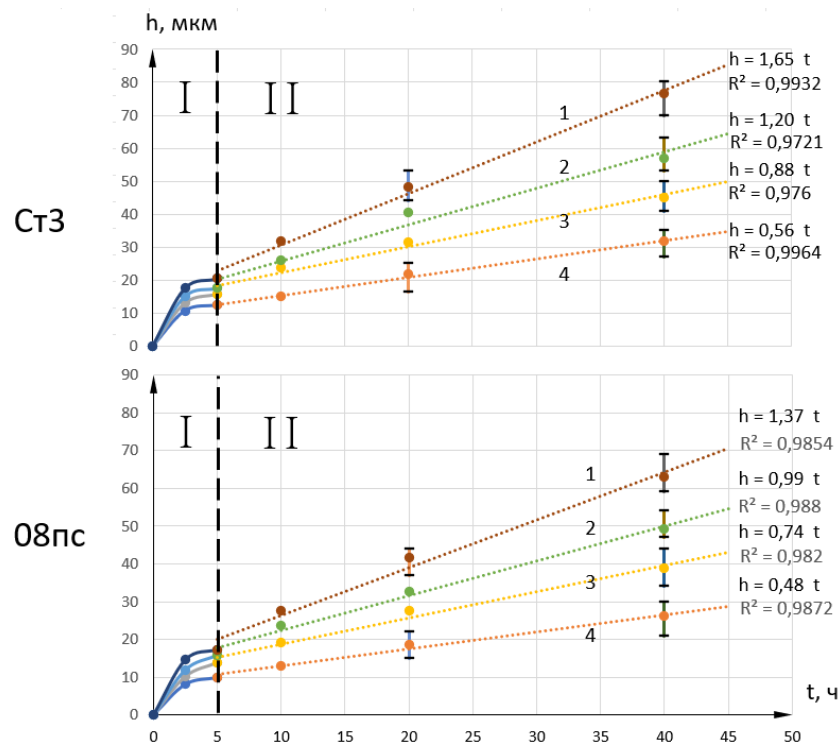


Рисунок 5 – Временная зависимость роста глубины коррозионных язв, образовавшихся на поверхности зон № 1 (σ_{p1}), 2 (σ_{p2}), 3 (σ_{p3}), 4 (σ_{p4}) образцов сталей Ст3 и 08пс

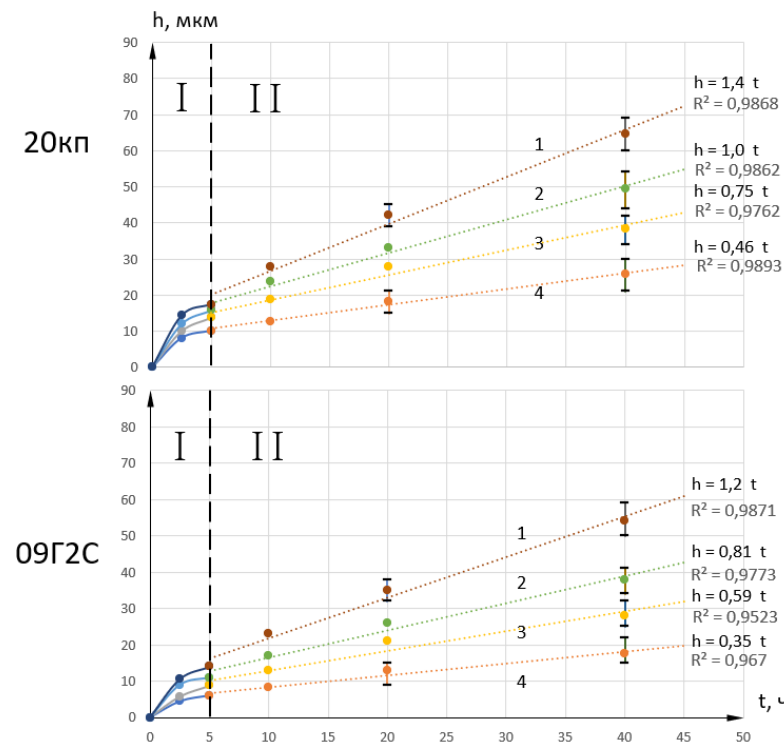


Рисунок 6 – Временная зависимость роста глубины коррозионных язв, образовавшихся на поверхности зон № 1 (σ_{p1}), 2 (σ_{p2}), 3 (σ_{p3}), 4 (σ_{p4}) образцов сталей 20кп и 09Г2С

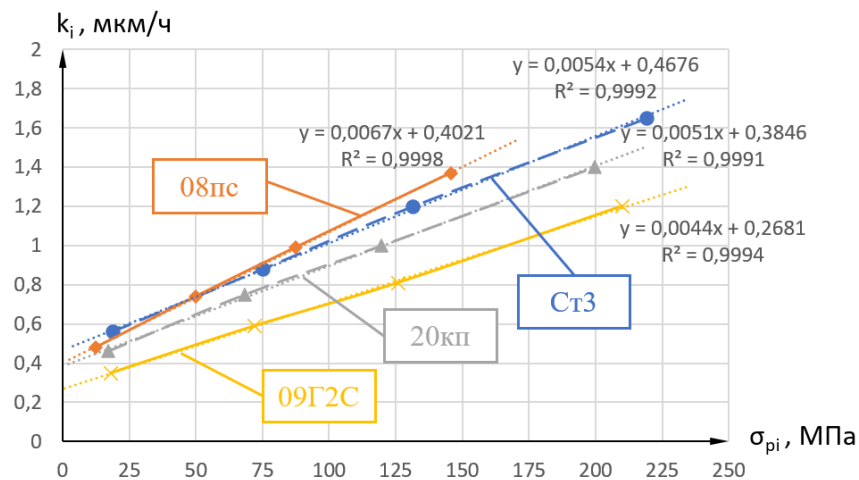


Рисунок 7 – Зависимость скорости язвенной коррозии сталей от величины растягивающих напряжений в окружающем язву металле

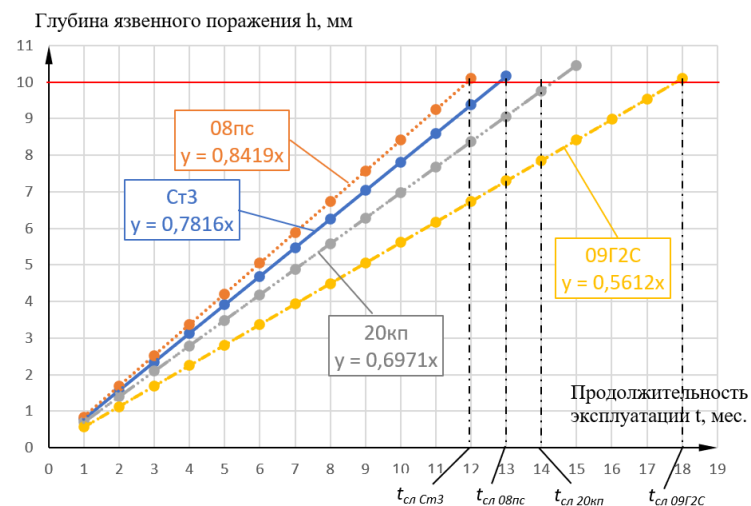


Рисунок 8 – Срок службы промышленного нефтепровода 426x10 мм, пораженного язвенной коррозией, в зависимости от используемой марки трубной стали