

На правах рукописи



ОВЧИННИКОВ ИЛЬЯ ИГОРЕВИЧ

**ВОПРОСЫ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ,  
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С АГРЕССИВНЫМИ СРЕДАМИ  
И ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ**

Специальность 2.1.9. Строительная механика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Саратов 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Научный консультант – академик РААСН,  
доктор технических наук, профессор  
**Петров Владилен Васильевич**

Официальные оппоненты: **Шеин Александр Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Механика» ФГБОУ ВО  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»

**Трещев Александр Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Строительство,  
строительные материалы и конструкции»  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный  
университет», член-корреспондент  
Российской Академии Архитектуры  
и Строительных Наук (РААСН)

**Шляхин Дмитрий Аверкиевич**  
доктор технических наук, доцент, заведующий  
кафедрой «Строительная механика, инженерная  
геология, основания и фундаменты»  
ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
технический университет»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет» (г. Волгоград)

Защита состоится «22» декабря 2023 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.05 в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, ауд. 101 бизнес-инкубатора.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» и на сайте <https://cchgeu.ru>

Автореферат разослан «12» октября 2023 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Макеев  
Алексей Иванович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Многие инженерные сооружения и их конструктивные элементы в процессе эксплуатации подвергаются воздействию разных агрессивных сред – аппараты химической промышленности и конструкции водородных двигателей – воздействию водорода, элементы атомных реакторов – воздействию водородного и радиационного охрупчивания; металлические конструкции – коррозионному износу и растрескиванию, армированные бетонные конструкции – воздействию карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии. К настоящему времени основными методами расчета конструкций с учетом воздействия агрессивных сред пока еще остаются такие, как введение запасов на коррозию, использование упрощенных расчетных моделей, в которых не учитывается процесс деструкции материала, а в расчет принимается материал с измененными свойствами.

Хороший обзор состояния проблемы в свое время провел профессор Локощенко А.М., но в его обзоре не рассматриваются задачи моделирования конструкций с учетом эффектов радиационного охрупчивания, карбонизации, хлоридной коррозии. Под руководством А.М. Локощенко и С.А. Шестерикова проводились исследования по построению моделей длительной прочности и ползучести материалов и конструкций в ряде агрессивных сред.

Экспериментальному изучению влияния агрессивных сред на поведение материалов и конструкций посвящены работы ученых Леннефтехима (под руководством Арчакова Ю.И., Колачева В.А.), НИИХИММаша. Большой вклад в решение проблемы оценки долговечности конструкций, подвергающихся силовому и средовому воздействию, выполнен под руководством академика РААСН Бондаренко В.М. Исследования поведения железобетонных конструкций, подвергающихся коррозии, проводятся под руководством академиков РААСН Колчунова В.И., Селяева В.П., Травуша В.И. и профессора Федоровой Н.В. Под руководством академика РААСН Ерофеева В.Т. проводятся исследования биологической коррозии строительных материалов и разрабатываются модели прогнозирования их долговечности. Под руководством чл.-корр. РААСН профессора Трещева А.А. моделируется влияние водородсодержащей среды на пластинчатые и оболочечные конструкции. Значительный объем исследований проводится в Саратове под руководством академика РААСН В.В. Петрова. В работах Саратовской школы механики намечен общий подход к построению моделей конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред.

Однако в подавляющем большинстве упомянутых исследований моделируется поведение конструкций при действии агрессивных сред без детальной конкретизации вида агрессивных сред и особенностей их воздействия и не рассматривается интенсифицирующее влияние уровня и вида напряженно-деформированного состояния на кинетику процессов взаимодействия агрессивных сред с материалом конструкций.

Исследований, в том числе зарубежных, посвященных анализу влияния вида и уровня напряженно-деформированного состояния на процессы взаимодействия конструкций с водородсодержащими средами, радиационными средами, на коррозионный износ, процессы проникания хлоридсодержащих сред в армированные конструкции, недостаточно. Также весьма мало исследований, посвященных анализу влияния нескольких факторов (нагрузки, температуры, агрессивной среды, нескольких агрессивных сред) на напряженно-деформированное состояние и долговечность конструкций.

Таким образом, рассмотрение в настоящей диссертации вопросов расчета поврежденных армированных и неармированных конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами, с учетом вышеотмеченных особенностей является актуальным и перспективным направлением.

В работе были использованы имеющиеся в открытом доступе экспериментальные данные по влиянию указанных агрессивных сред и физических полей на конструкции и их элементы.

**Цель работы:** развитие механики конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями с учетом влияния уровня и вида напряженно-деформированного состояния на кинетику процессов взаимодействия агрессивных сред с материалом конструкций, а также с учетом совместного влияния ряда факторов (нагрузки, температуры, нескольких агрессивных сред).

В процессе решения сформулированной проблемы было проанализировано влияние различных агрессивных сред и физических полей на материалы и конструкции с учетом интенсифицирующего действия напряженно-деформированного состояния на кинетику воздействия агрессивных сред и выявлены основные эффекты, а также поставлены следующие **задачи**:

– развить общий подход к построению моделей деформирования и разрушения конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями с учетом интенсифицирующего действия напряженно-деформированного состояния на кинетику их взаимодействия;

– построить модель коррозионного растрескивания конструкций в условиях низкотемпературного наводороживания, с использованием которой исследовать влияние схемы нагружения на характер напряженного состояния толстостенных труб при совместном воздействии нагрузки и наводороживания;

– построить конечно-элементную модель деформирования и разрушения толстостенных труб, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии при локальном прогреве. С применением данной модели провести анализ напряженно-деформированного состояния и долговечности труб, подвергающихся совместному воздействию нагрузки, неоднородного температурного поля и водородной коррозии;

– построить модель деформирования и разрушения металлических конструкций, взаимодействующих с жидкометаллическими средами, с помощью которой провести исследование поведения трубопровода, подвергающегося обезуглероживанию в жидком натрии;

– построить модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению, выполнить ее идентификацию и верификацию;

– построить модель деформирования дискретно армированного материала в условиях совместного воздействия нагрузки, хлоридсодержащей среды и карбонизации с использованием которой исследовать эффект совместного действия карбонизации и хлоридсодержащей среды на армированные конструкции;

– построить расчетные модели коррозионного растрескивания с использованием различных теорий накопления повреждений, произвести их идентификацию и верификацию;

– построить модели коррозионного разрушения пластинчатых и оболочечных элементов конструкций, учитывающих влияние напряженного состояния, температуры, агрессивной среды на скорость коррозии; произвести идентификацию и верификацию этих моделей по экспериментальным данным; с использованием моделей коррозионного износа исследовать поведение составных оболочек вращения, подвергающихся неравномерному нагреву и коррозионному износу;

– сформулировать постановки задач оптимального проектирования пластинчатых конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред;

– рассмотреть примеры моделирования конструкций в агрессивной среде (армированные конструкции на упругом основании, многослойные конструкции при одновременном воздействии нагрузок, температур и агрессивной среды, водопропускные трубы и шлюзовые камеры).

**Научная новизна** работы состоит в решении актуальной научно-технической проблемы – разработки основ механики армированных и неармированных конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями с учетом влияния уровня и вида напряженно-деформированного состояния на кинетику процессов взаимодействия агрессивных сред с материалом конструкций, а также с учетом совместного влияния ряда факторов (нагрузки, температуры, нескольких агрессивных сред), в частности:

– развит общий подход к построению моделей деформирования и разрушения конструкций в агрессивных средах и физических полях с учетом интенсифицирующего влияния уровня и вида напряженного состояния на кинетику воздействия агрессивных сред, с использованием которого построен ряд важных моделей взаимодействия различных конструкций с водородосодержащими, жидкометаллическими, радиационными, коррозионными средами, разработаны методики и алгоритмы расчета этих конструкций с учетом воздействия агрессивных сред и выполнена их практическая реализация;

– впервые построены модели коррозионного растрескивания с использованием различных теорий накопления повреждений; а также модели деформирования и разрушения толстостенных труб, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии, в условиях локального прогрева; модели деформирования и разрушения металлов, взаимодействующих с жидкометаллическими средами; модели деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению; модели коррозионного разрушения пластинчатых и оболочечных элементов конструкций, учитывающие влияние напряженного состояния, температуры, агрессивной среды на скорость коррозии; модели деформирования дискретно армированного материала в условиях совместного воздействия нагрузки, хлоридсодержащей среды и карбонизации;

– получены новые результаты расчета трубчатых элементов конструкций, подвергающихся низкотемпературному наводороживанию, высокотемпературной водородной коррозии при локальном действии температуры, обезуглероживанию при контакте с натрием, а также результаты расчета составных оболочек вращения, подвергающихся неравномерному нагреву и коррозионному износу;

– получены новые результаты численных исследований поведения дискретно армированных конструкций, подвергающихся совместному воздействию нагрузки и нескольких агрессивных сред (карбонизации и хлоридной коррозии);

– предложены новые постановки задач оптимального проектирования пластинчатых конструкций, подверженных действию агрессивных сред;

– получены результаты анализа работы ряда армированных конструкций в агрессивной среде (армированных плитных конструкций на упругом основании, многослойных конструкций при совместном воздействии нагрузок, температур, агрессивной эксплуатационной среды, водопропускных труб и шлюзовых камер с учетом хлоридной коррозии).

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанный подход к построению моделей деформирования и разрушения конструкций в агрессивных средах и физических полях с учетом интенсифицирующего влияния уровня и вида напряженного состояния на кинетику воздействия агрессивных сред позволяет создавать модели деформирования и разрушения различных конструкций, подвергающихся совместному действию ряда интенсифицирующих факторов (нагрузок, температуры, агрессивных эксплуатационных сред в различных сочетаниях). Построенные модели позволяют проводить прогнозирование поведения различных конструкций, подвергающихся воздействию низкотемпературного наводороживания, высокотемпературной водородной коррозии, воздействию жидкометаллических сред и радиации, коррозионному износу. При этом учитывается нелинейность деформирования материала, эффекты ползучести, а также эффекты наведенной неоднородности, вызванные действием агрессивной среды и физических полей. Учет такого прогноза позволит

обеспечить надежную и безопасную работу конструкций, избежать преждевременного, нередко аварийного выхода конструкций из строя, что может привести к значительному ущербу для народного хозяйства, тяжелым экологическим последствиям.

Практическая значимость работы подтверждается поддержкой гранта РФФИ 12-01-31130 «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями» (Руководитель Овчинников И.И.)

Результаты работы использовались при разработке при участии автора ряда отраслевых нормативных документов, в том числе ОДМ 218.3.095-2017. Отраслевой дорожный методический документ. Защита от коррозии бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений. Федеральное дорожное агентство (Росавтодор). Москва, 2017. 143 с.

Теоретическая и практическая значимость подтверждается справками и актами об использовании результатов работы в разных организациях (научных, проектных, строительных, образовательных (университетах, институтах)), в том числе из КНР, Испании, Алжира.

**Методология и методы исследования.** Используются методы строительной механики и механики деформируемого твердого тела, методы решения нелинейных задач строительной механики: метод последовательных возмущений параметров, метод переменных параметров упругости, метод конечных элементов, метод сеток, метод дискретной ортогонализации. Получены основные соотношения, построены модели, проведена их идентификация и верификация.

**На защиту выносятся:**

– общий подход к построению моделей деформирования и разрушения конструкций в агрессивных средах и физических полях с учетом интенсифицирующего влияния уровня и вида напряженного состояния на кинетику воздействия агрессивных сред, а также построенные на его основе: модели коррозионного растрескивания с использованием различных теорий накопления повреждений; модель деформирования и разрушения толстостенных труб, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии, в условиях локального прогрева; модель деформирования и разрушения металлов, взаимодействующих с жидкометаллическими средами; модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению; модели коррозионного разрушения пластинчатых и оболочечных элементов конструкций, учитывающие влияние напряженного состояния, температуры, агрессивной среды на скорость коррозионных процессов; модель деформирования дискретно армированного материала в условиях совместного воздействия нагрузки, хлоридсодержащей среды и карбонизации;

– методики расчета трубчатых элементов конструкций, подвергающихся низкотемпературному наводороживанию, высокотемпературной водородной коррозии при локальном действии

температуры, обезуглероживанию при контакте с жидкометаллической средой (натрием);

- методика расчета составных оболочек вращения, подвергающихся неравномерному нагреву и коррозионному износу, скорость которого зависит от напряженного состояния и температуры;

- модель деформирования дискретно армированного материала в условиях совместного воздействия нагрузки, хлоридсодержащей среды и карбонизации, и результаты исследования с ее помощью эффекта совместного действия карбонизации и хлоридсодержащей среды на армированные конструкции;

- результаты идентификации и верификации построенных моделей с использованием экспериментальных данных;

- результаты расчета трубчатых элементов конструкций подвергающихся низкотемпературному наводороживанию, высокотемпературной водородной коррозии при локальном действии температуры, обезуглероживанию при контакте с натрием, а также результаты расчета составных оболочек вращения, подвергающихся неравномерному нагреву и коррозионному износу;

- постановки задач оптимального проектирования конструкций, подверженных действию агрессивных сред;

- результаты моделирования поведения конструкций в агрессивной среде (армированных плитных конструкций на упругом основании, многослойных конструкций при совместном воздействии нагрузок, температур, агрессивных сред, водопропускных труб и шлюзовых камер с учетом хлоридной коррозии).

**Достоверность** полученных результатов исследований подтверждается использованием фундаментальных положений строительной механики и механики деформируемого твердого тела при построении моделей деформирования и разрушения, сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными, а также с результатами других авторов.

**Внедрение результатов исследования** подтверждено справками, выданными различными образовательными, проектными, научными организациями.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с проблемами 01В08 «Развитие теории деформирования и разрушения конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами», 12.В.04 «Разработка теории и методов расчета конструкций транспортных сооружений при комплексном воздействии эксплуатационных нагрузок, температур и агрессивных сред» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались более чем на 40 конференциях, семинарах, чтениях, в том числе (приведены основные): на научно-технических



конференциях профессорско-преподавательского состава Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (2004 – 2022 гг.); Международной конференции по теории оболочек и пластин (Саратов, 2005), Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы строительства» (Саранск, 2004, 2006–2008), Всероссийской научно-технической конференции «Роль механики в создании эффективных материалов, конструкций и машин 21 века» (Омск, 2006), Международном конгрессе «Наука и инновации в строительстве SIB-2008. «Оценка риска и безопасность в строительстве». (Воронеж, 2008), Международной научно-технической конференции «Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов» (Волгоград, 2009), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (Тула, 2009, 2010, 2014, 2016), Международной научной конференции ИАС ТОГУ = The new Ideas of New Century (Хабаровск, 2011–2017), Международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Пермь, 2012–2016), академических научных чтениях «Проблемы архитектуры, градостроительства и строительства в социально-экономическом развитии регионов» РААСН (Тамбов-Воронеж, 2012), IV Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» (Челябинск, 2012), научно-практической конференции «Оценка риска и проблемы безопасности в строительном комплексе» (Баку, 2013), Международной научно-практической конференции «Инновации и исследования в транспортном комплексе» (Курган, 2013–2015), Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы механики деформируемого твердого тела, математического моделирования и информационных технологий», (Чебоксары, 2013), III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее» (Москва, 2014), III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (Новосибирск, 2014), III Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве» (Пенза, 2014), Международной конференции «Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика» (Казань, 2016), Всероссийской научно-практической конференции «Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области» (Саратов, 2018), Международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе» (Пермь, 2020), Международной научно-практической конференции «Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций» (Саратов, 2021), IX Международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе»

(Саратов, 2021), 22 Международной научной конференции «Новые идеи нового века» (Хабаровск, 2022), научном семинаре в Харбинском политехническом университете (Харбин, КНР, июль 2022).

Диссертационная работа доложена на расширенном заседании кафедр «Строительные материалы, конструкции и технологии» и «Транспортные сооружения» СГТУ имени Гагарина Ю.А. (г. Саратов, 2023 г.).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 96 научных работах, в их числе: 10 монографий, 51 статья в научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России для докторских диссертаций, 11 статей в журналах, входящих в международные базы цитирования.

**Структура и объем работы.** Диссертация объемом 494 страницы состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 544 наименований и 6 приложений.

Автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту Владилену Васильевичу Петрову, академику Российской академии архитектуры и строительных наук, доктору технических наук, профессору кафедры «Строительные материалы, конструкции и технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. за ценные советы по диссертационной работе.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранного направления исследований, формулируются цель и задачи научного исследования, отмечается новизна и практическая значимость работы, приводится общая характеристика работы и основные положения, которые автор выносит на защиту. Обосновывается рассматриваемый в работе подход к развитию основ теории расчета конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями с учетом влияния уровня и вида напряженно-деформированного состояния на кинетику процессов взаимодействия агрессивных сред с материалом конструкций, а также с учетом совместного влияния ряда факторов (нагрузки, температуры, нескольких сред).

**В первой главе** диссертации рассмотрены виды агрессивных сред и особенности их воздействия на материалы и конструкции, причем рассмотрено воздействие таких сред, влияние которых достаточно изучено в экспериментах, и имеющих экспериментальных данных по их взаимодействию с материалами и конструкциями достаточно для проведения структурной и параметрической идентификации, то есть для построения математических моделей взаимодействия конструкций с эксплуатационными средами и физическими полями и для определения коэффициентов и функций в этих моделях.

Одной из достаточно распространенных агрессивных сред является водородсодержащая среда, которая применяется в химической, нефтеперерабатывающей, газовой промышленности. Различается воздействие водорода при низких температурах (низкими условно называют

нормальные температуры), когда имеет место наводороживание металлов, приводящее к их водородному охрупчиванию, а также водородное воздействие при высоких температурах (свыше 200° С) и давлениях (более 5 МПа), которое приводит к водородной коррозии. И водородное охрупчивание, и водородная коррозия приводят к изменению механических характеристик, но феноменологические механизмы их действия различаются.

В ядерных реакторах в качестве теплоносителя может применяться жидкометаллическая среда (жидкий натрий, литий, сурьма), потому рассмотрены экспериментальные данные по взаимодействию конструкционных материалов с жидкометаллическими средами, которое приводит к обезуглероживанию сталей и к изменению их механических свойств, что, в конечном счете, сказывается на долговечности трубопроводов, по которым транспортируется жидкометаллическая среда.

Воздействию радиационных полей подвергаются элементы несущих конструкций ядерных реакторов, могильников радиоактивных отходов, хранилищ отработанного топлива. Воздействие радиационного поля приводит к существенным изменениям механических свойств материалов (причем данное изменение может носить необратимый характер и быть зависимым от уровня и вида напряженного состояния).

Были рассмотрены среды, влияние которых на поведение конструкций проявляется в изменении размеров и формы конструкций, то есть рассматривается коррозионное разрушение (износ) металлических конструкций. Причем, как показывает анализ экспериментальных данных, на кинетику коррозионных процессов влияет ряд факторов: напряженно-деформированное состояние конструкций (причем не только уровень, но и вид напряженного состояния), температура, степень агрессивности эксплуатационной среды, наличие защитного покрытия на конструкциях.

В работе рассмотрены хлоридсодержащие агрессивные среды и проанализировано влияние их на арматуру и матрицу армированных конструкций. Хлоридсодержащие среды оказывают деструктирующее воздействие на матрицу (в частном случае – на бетон), вызывают коррозионный износ арматуры, при этом продукты коррозии, превосходя в объеме прородировавший металл, оказывают сильное давление на окружающую матрицу, приводя к появлению трещин в конструкциях, последующему нарушению сцепления арматуры с матрицей и снижению несущей способности и долговечности конструкций. Напряженное состояние оказывает интенсифицирующее воздействие на эти процессы.

При воздействии углекислоты воздуха на железобетонные конструкции происходит процесс карбонизации бетона: на поверхности, а далее и в более глубоких слоях. В итоге в арматуре становится возможным появление и развитие коррозионных процессов, скорость которых зависит от влажности и температуры среды, скорости поступления кислорода к корродирующей поверхности. Во многих случаях процесс карбонизации железобетонных конструкций протекает совместно с хлоридной коррозией, и в настоящее

время имеется возможность построить и провести идентификацию модели деформирования железобетонных конструкций, подвергающихся одновременному действию карбонизации и хлоридной коррозии.

Практически во всех рассмотренных выше случаях взаимодействия конструкций с агрессивными средами имеет место действие нескольких факторов, например, совместное действие нагрузок и агрессивных сред на конструктивные элементы, нередко к этим факторам добавляется интенсифицирующее действие температуры. В результате под влиянием совместного действия указанных факторов напряженно-деформированное состояние конструкций изменяется, а это приводит к ускоренному развитию коррозионных процессов в конструкциях, приводя к ускоряющемуся процессу снижения несущей способности и сокращению долговечности конструкций.

Далее в главе проведен анализ существующих подходов к моделированию поведения конструкций в агрессивных средах.

Отмечается, что учет низкотемпературного наводороживания производился в работах В.Я. Суворина, Б.Ф. Юрайдо, Harris Jr., Van Wanderham M.S., А.П. Корчагина, И.Г. А.Н. Подгорного, И.Г. Овчинникова с учениками, В.С. Харина, А.Е. Андрейкива, В.И. Астафьева, Л.К. Ширяевой, А.А. Трещева с учениками, В.П. Федотова, В.В. Лепова. В работах этих авторов предприняты попытки одностороннего учета влияния водорода: либо не учитывается влияние и концентрации водорода и схемы напряженного состояния на изменение свойств материалов, либо, наоборот, не учитывается влияние напряженного состояния на проникание водорода в конструкцию.

Учету влияния водорода высоких параметров при расчете конструкций посвящены исследования М.Б. Асвияна, Ю.И. Арчакова с сотрудниками, В.В. Петрова и И.Г. Овчинникова с учениками, В.С. Павлины; в диссертации проведен сопоставительный анализ предложенных ими моделей.

Вопросы учета влияния жидкометаллических сред при моделировании поведения нагруженных конструкций рассмотрены в работах В.И. Никитина, Чопры, Натесана, Ю.Ф. Баландина, О.В. Старкова, Ю.М. Трапезникова, А.А. Javerssoli, Н. Jonson, Snyder R.B.

Проблемы расчета конструкций с учетом влияния радиационных сред рассматривались в большом количестве работ. Отметим исследования Ю.И. Ремнева, А.А. Ильюшина, П.М. Огибалова, Vaidyanthian S., Sim R.G., Ю.И. Лихачева, В.Я. Пупко, А.А. Прошкина, Bates J., Straalsand J., И.С. Куликова, Б.Е. Тверковкина, А.А. Тутнова, Е.М. Морозова, Г.П. Никишкова, Г.С. Писаренко, В.Н. Киселевского, В.Б. Дубровского, Р.А. Хечумова, З. Аблевича, В.И. Андреева, Г.П. Карзова, И.Г. Овчинникова, В.В. Петрова, В.А. Игнатьева, В.И. Морозова, В.А. Горохова, С.А. Капустина, Б.З. Марголина, А.А. Бучатского, Л.В. Сергеевой и других.

Вопросы учета влияния агрессивных сред, вызывающих коррозионный износ нагруженных конструкций, рассматривались в значительном числе работ. Отметим исследования И.А. Притыкина, В.Д. Райзера, Аль Малюля, В.М. Долинского, М.С. Корнишина, Э.М. Гутмана, И.Г. Овчинникова и

В.В. Петрова с учениками, С.И. Трушина, В.К. Иноземцева, Н.Ф. Синевой, Г.А. Наумовой, Ю.М. Почтмана, Д.Г. Зеленцова.

Задачи моделирования поведения армированных конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами рассматривались в работах Е.А. Гузеева, Л.М. Пухонто, В.И. Соломатова, В.П. Селяева, В.В. Петрова и И.Г. Овчинникова с учениками, А.А. Трещева с учениками, J. Wright, G. Frohnsdorf, Н.В. Савицкого, А.И. Попеско, В.М. Бондаренко, В.И. Римшина, Н.Б. Кудайбергенова, Р.Б. Гарибова, С.Н. Леоновича, Б.В. Гусева, В.Ф. Степановой, Н.К. Розенталь, В.Т. Ерофеева, В.И. Колчунова, Г.А. Гениева, С.В. Федосова, Н.В. Федоровой, В.А. Пшеничкиной, К.А. Пирадова, Н. Takegami, K. Ishida, K. Maekawa, Wright J., A. Saetta, R. Scotta, R. Vitaliani.

Общие подходы к моделированию поведения конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами, развивались в работах Ю.Н. Работнова, Л.М. Качанова, А.П. Филина, В.М. Бондаренко, А.М. Локощенко, В.В. Петрова, И.Г. Овчинникова и их учеников и последователей.

Проблеме оптимального проектирования конструкций с учетом воздействия агрессивных условий эксплуатации посвящены исследования Ю.М. Почтмана, И.Г. Овчинникова, Д.Г. Зеленцова, А.П. Дзюбы, А.В. Перельмутера, Л.С. Ляховича и других.

**Во второй главе** рассматривается предлагаемый общий подход к построению моделей деформирования и разрушения конструкций в агрессивных средах и физических полях с учетом интенсифицирующего воздействия вида и уровня напряжений и повреждений на кинетику воздействия агрессивных сред, основанный на подходах Ю.Н. Работнова, Л.И. Седова, А.П. Филина.

При совместном воздействии нагрузки и температуры в материале происходят два взаимосвязанных влияющих друг на друга процесса: деформирование и разрушение. Причиной деформирования может быть и ползучесть, и рост микроповреждений, влияющих на механические характеристики материала, что в итоге приводит к развитию деформаций. При воздействии на материал конструкций агрессивные среды и физические поля приводят к изменению механических свойств, оказывая влияние на процессы деформирования и разрушения. Развитие процессов деформирования и разрушения, со своей стороны, влияет на кинетику воздействия агрессивных сред и физических полей.

Для описания процессов деформирования и разрушения в агрессивных средах и физических полях применяется система параметров, которая включает: напряжения  $\sigma$ , деформации  $\varepsilon$ , температуру  $T$ , параметр поврежденности  $\Pi$ , время  $t$  и дополнительные структурные параметры:  $C$  – параметр распределения влияния агрессивной среды по объему элемента (в случае влияния радиации этот параметр представляет собой дозу облучения  $\Phi$ );  $\mu$  – параметр химического взаимодействия;  $\psi$  – параметр сплошности.

В таблице 1 приведены агрессивные среды и физические поля, которые могут воздействовать на конструкции, а также приведены параметры, учитывающие эти воздействия.

Таблица 1 – Агрессивные среды и физические поля, которые могут действовать на конструкции, и учитывающие их параметры

Вид агрессивного воздействия	Параметры, учитывающие агрессивное воздействие
<b>Агрессивные среды</b>	
<b>Атмосферная коррозия</b> – разрушение материалов, вызванное воздухом и содержащимися в нем загрязнителями	Параметр сплошности $\psi$ или интегральный параметр – глубина коррозионного износа $\delta$
<b>Грунтовая коррозия</b> – разрушение металла под воздействием агрессивной почвенной среды	Параметр сплошности $\psi$ или интегральный параметр – глубина коррозионного износа $\delta$
<b>Коррозия в среде жидких топлив</b>	Параметр сплошности $\psi$ или интегральный параметр – глубина коррозионного износа $\delta$
<b>Газовая коррозия</b> – разрушение металла при контакте с сухими газами при высоких температурах.	Параметр сплошности $\psi$ или интегральный параметр – глубина коррозионного износа $\delta$
<b>Низкотемпературное наводороживание</b>	Концентрация водорода в точке конструкции $C$ , параметр $S$ , учитывающий схему напряженного состояния
<b>Высокотемпературная водородная коррозия</b>	давление водорода $P$ в точке конструкции, параметр химического взаимодействия $\mu$
<b>Карбонизация</b>	Параметр химического взаимодействия $\mu$
<b>Влияние хлоридсодержащей среды</b>	Концентрация хлоридов $C$
<b>Коррозионное растрескивание металлов и высокопрочной арматуры</b>	Параметр поврежденности Ю.Н. Работнова $\Pi$ , или параметр мгновенной прочности А.Р. Ржаницына $r$
<b>Одновременное действие карбонизации и хлоридной коррозии</b>	Концентрация хлоридов $C$ , параметр химического взаимодействия $\mu$
<b>Физические поля</b>	
<b>Обезуглероживание в жидкометаллической среде</b>	Концентрация $C$ углерода в точке конструкции
<b>Влияние радиационной среды</b>	Доза (флюенс) нейтронного облучения $\Phi$ , параметр радиационного набухания $\varepsilon_{\phi}$

Уравнение для параметра  $C$  имеет следующую форму (по образцу уравнения массопереноса):

$$\partial C / \partial t = \operatorname{div} (D \operatorname{grad} C) - g(C), \quad (1)$$

где  $D = D(\sigma, \varepsilon, T, \Pi, C, \mu)$  – коэффициент диффузии,  $g(C)$  – функция, учитывающая связывание агрессивной среды в процессе химических превращений.

Изменение параметра химического взаимодействия  $\mu$  описывается уравнением

$$d\mu = f_1 dt + f_2 dC + f_3 d\Pi + f_4 dT, \quad (2)$$

где  $f_1, f_2, f_3, f_4$  – функции параметров  $\mu, C, \Pi, T$  соответственно.

Изменение сплошности  $\psi$  описывается уравнением массопереноса:

$$\partial \psi / \partial t = \operatorname{div} (G \operatorname{grad} \psi), \quad (3)$$

где  $G$  – параметр коррозионного сопротивления.

Для получения полной системы уравнений, описывающей поведение конструкций при воздействии на нее агрессивных эксплуатационных сред и физических полей, к приведенным ранее соотношениям добавлены уравнения равновесия конструкции, геометрические соотношения и уравнения неразрывности, физические соотношения, начальные и граничные условия для каждой группы уравнений.

Далее подробно рассматриваются вводимые дополнительно параметры поврежденности  $\Pi$ , распределения влияния агрессивной среды по объему  $C$ , химического взаимодействия  $\mu$ , уравнения для них и методы решения этих уравнений. Отдельно рассматривается проблема идентификации построенных уравнений.

При построении моделей поведения конструкций в экстремальных условиях эксплуатации полагается, что обобщенная модель деформирования и разрушения конструкций состоит из нескольких моделей, в том числе:

- модели конструктивного элемента (стержень, пластина, оболочка, тонкостенный стержень, система стержней, пластинок и оболочек);

- модели программы нагружения конструктивного элемента (статическое, динамическое, ударное, циклическое);

- модели проникания агрессивной среды в объем конструкции и взаимодействия ее с материалом (диффузия, фильтрация, химическое взаимодействие, деструкция, коррозионное разрушение);

- модели деформирования материала с учетом воздействия агрессивной среды или физического поля (упругая модель, нелинейно-упругая модель, упругопластическая модель, вязкоупругая модель, модель ползучести);

- модели наступления предельного состояния (модель кратковременного разрушения, модели длительной прочности – накопления повреждений).

Завершается вторая глава применением различных моделей накопления повреждений к описанию кинетики коррозионного растрескивания и сопоставлением этих моделей.

**В третьей главе** рассматривается моделирование поведения трубчатых конструкций в водородсодержащих средах с учетом влияния напряженного состояния и поврежденности на кинетику проникания водорода: рассмотрено деформирование и разрушение материалов в условиях низкотемпературного наводороживания (первая задача) и высокотемпературной водородной коррозии (вторая задача).

Для первой задачи при построении модели деформирования и разрушения материалов в условиях низкотемпературного наводороживания были учтены следующие эффекты: проникание по механизму активированной диффузии водорода в конструкцию, причем вследствие диффузии водорода возможен его перенос из зон с преобладанием компонентов сжатия в зоны с преобладанием компонентов растяжения; таким образом, напряженное состояние конструкции влияет на кинетику наводороживания. Проникая в металл конструкций, водород снижает его прочность и пластичность (в зависимости от концентрации водорода). Напряженное состояние влияет на конструкцию следующим образом: в случае преобладания компонентов сжатия металл после наводороживания сохраняет свойства, а в случае преобладания компонентов растяжения – свойства (прочностные, пластические) снижаются, причем с возрастанием уровня напряженного состояния свойства меняются значительно.

Рассмотрены два подхода к учету влияния напряженного состояния на кинетику проникания водорода: первый с помощью уравнения вида

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - \left( \frac{DV_H}{RT} \right) \nabla C \nabla \sigma_0 - \left( \frac{DV_H}{RT} \right) C \nabla^2 \sigma_0, \quad (4)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии, являющийся функцией локальных параметров – концентрации  $C$  и температуры  $T$ ,  $t$  – время,  $V_H$  – парциальный молярный объем водорода,  $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$  – среднее напряжение,  $R$  – газовая постоянная; и второй – путем введения зависимостей коэффициента диффузии водорода  $D$  и предельного водородопоглощения  $C^*$  от введенного безразмерного параметра:

$$S = \frac{3\sigma_0}{\sigma_U}, \quad (5)$$

который характеризует напряженное состояние,  $\sigma_U$  – интенсивность напряжений.

Для построения модели деформирования применялась теория А.А. Ильюшина, измененная для учета влияния водорода. Принималось, что интенсивность напряжений  $\sigma_u$  является функцией интенсивности деформаций  $\varepsilon_u$ , параметра  $S$  и концентрации водорода  $C$ :

$$\sigma_u = \varphi(\varepsilon_u, S, C), \quad (6)$$

причем эта функция имеет вид

$$\varphi(\varepsilon_u, S, C) = \begin{cases} \varphi_0(\varepsilon_u); & S \leq S_0 \\ \varphi_1(\varepsilon_u, S, C); & S > S_0 \end{cases} \quad (7)$$



Также предложена модель наступления предельного состояния материала в среде водорода в виде

$$\sigma_U = \sigma_B^0 \text{ при } S \leq S_0, \quad (8)$$

$$\sigma_U + \{\exp[kC^\alpha(S - S_0)^b] - 1\}\sigma_1 = \sigma_B^0 \text{ при } S > S_0. \quad (9)$$

Рассмотрено применение предложенных соотношений к задаче о наводороживании нагруженного толстостенного трубопровода при осесимметричном воздействии нагрузки и водородсодержащей среды, поведение трубопровода описывается нелинейным разрешающим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \lambda \frac{d\sigma_r}{dr} + \eta\sigma_r = F, \quad (10)$$

коэффициенты  $\lambda$  и  $\eta$  в котором представляют собой сложные нелинейные функции секущего модуля  $\psi$  и коэффициента поперечной деформации  $\nu$  и их производных, причем

$$\psi(\varepsilon_u, C, S) = \begin{cases} A_0 - B_0\varepsilon_u^{m-1} & \text{при } S < S_0 \\ A_0 - B_0\theta^{1-m}(C, S)\varepsilon_u^{m-1} & \text{при } S \geq S_0 \end{cases}. \quad (11)$$

Распределение водорода по объему стенок трубопровода находится из уравнения диффузии. Разработана методика решения полученных уравнений и проведено исследование влияния напряженного состояния на водородопроницаемость при разных случаях нагружения трубопровода и воздействия водорода.

Во второй задаче – высокотемпературной водородной коррозии конструкций – для учета основных эффектов в систему определяющих параметров дополнительно включены параметр внутреннее давление водорода в точке объема конструкции  $P$  и параметр химического взаимодействия  $\mu$ , для которых построены соответствующие уравнения и проведена их идентификация. С использованием этих уравнений проведено исследование кинетики изменения напряженно-деформированного состояния при ползучести трубы в условиях высокотемпературной водородной коррозии. Также исследована ползучесть и разрушение толстостенной трубы, подвергающейся водородной коррозии в условиях локального прогрева, наиболее опасного с точки зрения эксплуатации. Для анализа использован программный комплекс ANSYS, в котором был реализован следующий порядок этапов: построение геометрической модели; разбивка на конечные элементы и выбор функций формы элемента; построение матриц жесткости, задание нагрузок; решение канонических уравнений, в которых характеристики материала зависят от параметра химического взаимодействия; определение перемещений, деформаций и напряжений.

На рисунке 1 показан фрагмент трубы с локальным температурным воздействием и примененным конечно-элементным разбиением.

На рисунке 2 приведены радиальные, окружные и осевые напряжения (внутреннее давление 20 МПа).

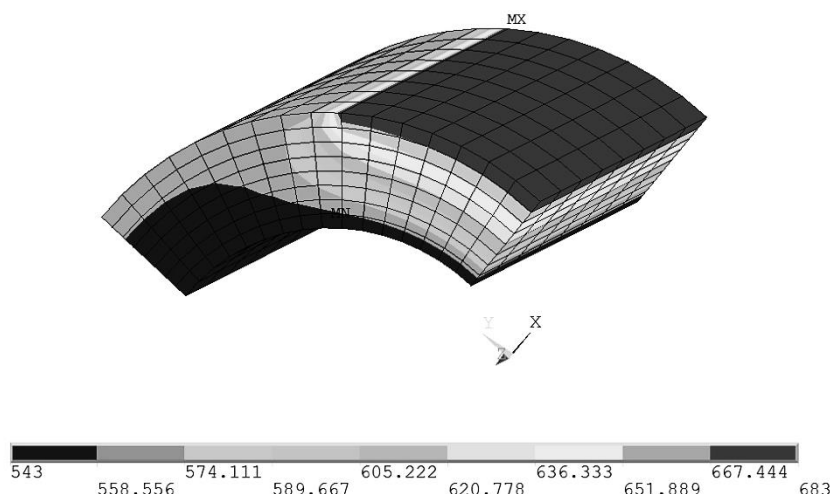


Рисунок 1 – Фрагмент трубы с локальным температурным воздействием и примененным конечно-элементным разбиением

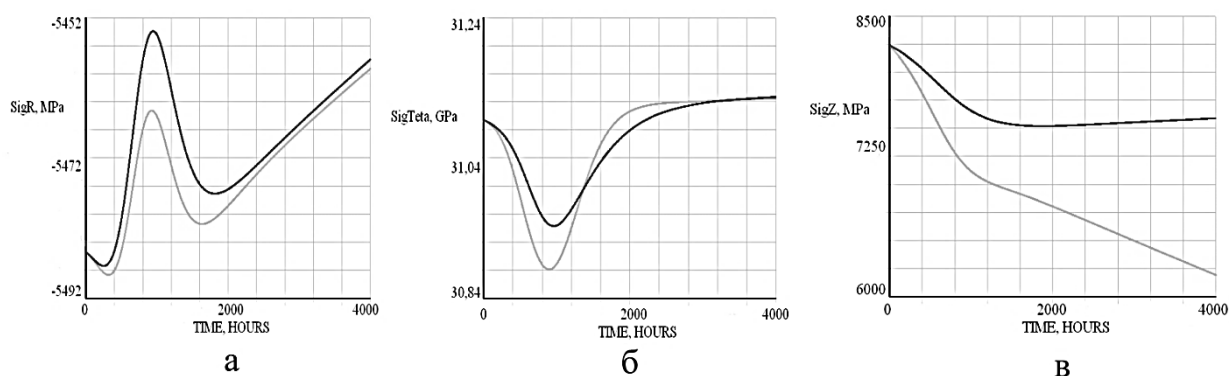


Рисунок 2 – а – радиальные напряжения, б – окружные напряжения  
в – осевые напряжения (внутреннее давление принималось равным 20 МПа)  
(темная линия – «холодная» зона, светлая – зона локального прогрева)

**В четвертой главе** рассмотрено моделирование поведения конструкций в жидкометаллических и радиационных средах с использованием единого подхода.

Для построения моделей деформирования и разрушения сталей при их взаимодействии с жидким натрием применялись следующие определяющие параметры: напряжение  $\sigma$ , деформация  $\epsilon$ , температура  $T$ , поврежденность  $\Pi$ , а также дополнительный параметр – концентрация  $C$  углерода в точке конструкции, который характеризует интенсивность воздействия жидкометаллической среды на характеристики ползучести и длительной прочности. Из решения уравнения диффузии находится закон распределения концентрации углерода по объему конструктивного элемента, учитывая, что в рассматриваемой точке коэффициент диффузии углерода  $D$  является зависимым от уровня напряжений, поврежденности и температуры. Дополнительно было учтено, что обезуглероживание ведет к ускорению процесса ползучести; на кривых ползучести присутствуют все стадии ползучести; деформации для одинакового уровня напряжений при обезуглероживании ведут к нарастанию деформаций при разрушении; возрастание напряжений уменьшает эффект повышения скорости

ползучести вследствие обезуглероживания; обезуглероживание ведет к смещению и повороту кривых  $P^*(\sigma)$ , где  $P^*$  – предельная деформация ползучести; обезуглероживание ведет к существенному снижению долговечности, к параллельному смещению кривых длительной прочности в логарифмических координатах. Для всех трех стадий ползучести уравнения ползучести и накопления повреждений принимались в следующем виде:

$$\frac{dp}{dt} = A \cdot p^{-\alpha} \cdot \left(\frac{\sigma}{1 - \mu \cdot \Pi}\right)^k, p(0) = 0, p(t_p) = p^*; \quad (12)$$

$$\frac{d\Pi}{dt} = \frac{B \cdot \sigma^n}{(1 - \Pi)^{n+S}}, \Pi(0) = 0, \Pi(t_p) = 1;$$

где  $t_p$  – время до разрушения;  $A, B, S, \alpha, k, n, \mu$  – некоторые коэффициенты,  $\Pi$  – поврежденность. Зависимость коэффициентов уравнений (12) от концентрации углерода позволила учесть влияние обезуглероживания на кинетику деформирования и разрушения. Разработана методика и проведена идентификация уравнений по экспериментальным данным.

Затем с использованием приведенных уравнений исследовано поведение стержневого элемента, взаимодействующего с жидкометаллической средой, а также построена модель деформирования толстостенного трубопровода с учетом влияния жидкометаллической среды, разработана методика расчета и исследовано влияние жидкометаллической среды на его поведение. На рисунке 3 показаны эпюры напряжений по радиусу трубы в различные моменты времени. Видно, что наибольшее перераспределение характерно для окружных  $\sigma_{\theta}$  и продольных  $\sigma_z$  напряжений.

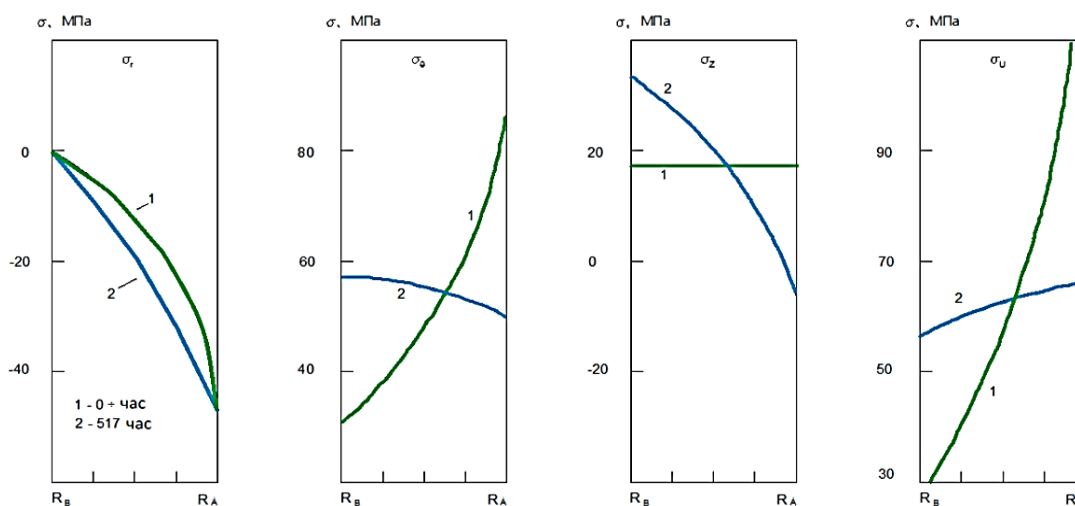


Рисунок 3 – Эпюры напряжений по радиусу трубы в различные моменты времени. Моменты времени 1 – 0 ч, 2 – 517 ч

Далее были рассмотрены вопросы учета влияния радиационного облучения при построении с применением теории структурных параметров моделей деформирования при радиационных воздействиях.

На основании анализа экспериментальных данных полагается, что под воздействием радиационной среды по всему объёму конструкции распределяется доза облучения, приводящая к изменению механических характеристик и к радиационному распуханию.

При использовании теории структурных параметров математическая модель деформирования и разрушения включает в себя и известные механические параметры (такие, как напряжение, деформации, поврежденность), и дополнительные структурные параметры – параметр радиационного распухания  $\varepsilon_\phi$  и дозу (флюенс) нейтронного облучения  $\Phi$ .

В работе построены пяти и семи параметрические модели деформирования и разрушения материала при его облучении, причем материал находится в одноосном напряженном состоянии. Семипараметрическая модель имеет вид

$$\frac{dp}{dt} = A(\Phi)p^{-\alpha(\Phi)} \exp[\beta(\Phi)p] \left( \frac{\sigma}{1-\Pi} \right)^{k(\Phi)},$$

$$\frac{d\Pi}{dt} = B(\Phi) \left( \frac{\sigma}{1-\Pi} \right)^{n(\Phi)} \frac{1}{(1-\Pi)^{s(\Phi)}}, \Pi(0) = 0, \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E(\Phi)} + p, \quad (13)$$

где  $E(\Phi)$  – модуль упругости, находящийся в зависимости от  $\Phi$ ,  $\varepsilon$  – полная деформация в рассматриваемой точке материала,  $p$  – деформация ползучести,  $t$  – время,  $\sigma$  – напряжение,  $\Pi$  – поврежденность, изменяющаяся в интервале от 0 при  $t = 0$  до  $\Pi = 1$  в момент разрушения. Величины  $A(\Phi)$ ,  $\alpha(\Phi)$ ,  $\beta(\Phi)$ ,  $k(\Phi)$ ,  $B(\Phi)$ ,  $n(\Phi)$ ,  $s(\Phi)$  являются коэффициентами модели, зависящими от флюенса  $\Phi$ , и, если надо, то и от температуры  $T$ .

В диссертации разработаны методики идентификации моделей, определены необходимые коэффициенты и проведено сопоставление с экспериментальными данными. На рисунках ниже приведены кривые ползучести стали для обычных условий (рисунок 4), и в условиях облучения (рисунок 5). На рисунках точками показаны экспериментальные значения, линиями – расчетные, по модели.

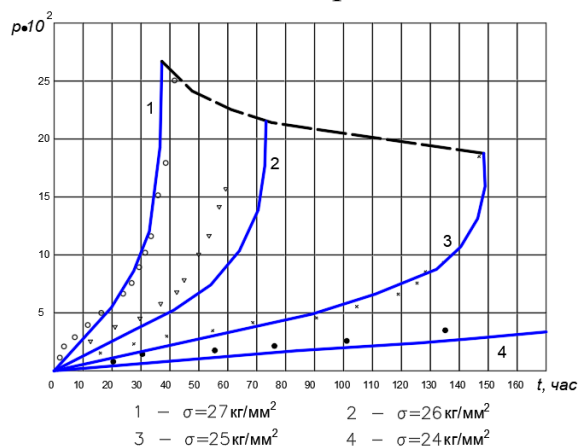


Рисунок 4 – Кривые ползучести стали в обычных условиях. Точками показаны экспериментальные значения, линиями – расчетные

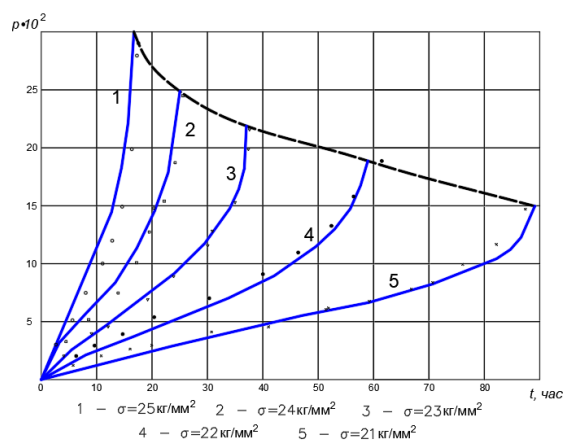


Рисунок 5 – Кривые ползучести стали при воздействии облучения. Точками показаны экспериментальные значения, линиями – расчетные

**Пятая глава** посвящена исследованию коррозионного разрушения конструкций с учетом влияния различных факторов на скорость коррозии. Сначала проведен анализ моделей коррозионного разрушения, учитывающих влияние напряженного состояния, температуры. Затем предложена модель коррозионного износа, учитывающая влияние температуры и концентрации агрессивной среды в виде

$$d\delta/dt = V = V_0(1 + \alpha C^\beta), \quad (14)$$

где  $\alpha(T)$ ,  $\beta(T)$  – коэффициенты, являющиеся квадратичными функциями температуры,  $C$  – концентрация агрессивной среды. Влияние напряженного состояния учитывается функцией  $V_0 = g \varepsilon(\sigma - \sigma_{\text{пор}})$ ,  $\sigma_{\text{пор}}$  – пороговое значение напряжения, ниже которого влияние напряженного состояния на скорость коррозионного процесса отсутствует,  $\varepsilon$  – деформация,  $g$  – коэффициент.

Для частного случая выполнена идентификация и верификация модели (14). На рисунке 6 представлены графики зависимости от времени глубины коррозионного поражения (а) и напряжений (б) в стенке конструкции.

Далее разработана методика идентификации модели коррозионного износа в случае двухосного напряженного состояния конструкции и проведена верификация модели.

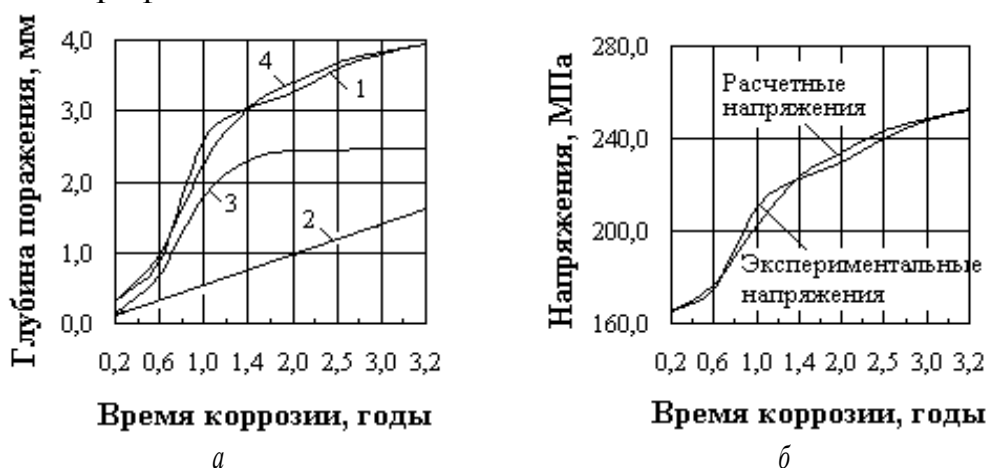


Рисунок 6 – Графики зависимости от времени глубины коррозионного поражения (а) и напряжений (б) в стенке (1 – экспериментальная кривая; 2 – глубина поражения от влияния НДС; 3 – глубина поражения без влияния НДС; 4 – суммарная расчетная глубина коррозионного поражения)

Во второй части главы рассмотрено моделирование поведения составной оболочки вращения, подвергающейся неравномерному нагреву и коррозионному износу, с переменной вдоль меридиана толщиной при совместном действии нагрузки, температуры и коррозии (рисунок 7). Материал оболочки упругий, но его свойства зависят от температуры.

Коррозионный износ поверхностей оболочки описывается уравнением

$$\frac{d\delta_i}{dt} = V_j(t)\chi_j(T)\varphi_j(\sigma_s), \quad j = 1, 2, \quad (15)$$

где  $j=1$  – соответствует внутренней,  $j=2$  – внешней поверхностям оболочки;  $\delta_j$  – глубина коррозионного износа;  $V_j(t)$  – скорость коррозии в

ненапряженном состоянии при некоторой базовой температуре  $T_i$ ;  $\chi_j(T)$  и  $\varphi_j(\sigma_s)$  – функции влияния температуры и напряжений;  $\sigma_s$  – некоторое эквивалентное напряжение.

Исследование напряженно-деформированного состояния оболочки вращения проводилось методом последовательных возмущений параметров В.В. Петрова (в данном случае – времени), причем величина шага по времени  $\Delta t$  подбиралась из условия удовлетворения необходимой точности решения задачи. На каждом временном шаге решается краевая задача для системы разрешающих уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dS} &= -\nu_2 \frac{\cos \varphi}{r} \xi - \nu \sin \varphi + \frac{1-\nu_1\nu_2}{E_1 h} \frac{\cos^2 \varphi}{r} (r \cdot N) + \frac{1-\nu_1\nu_2}{E_1 h} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{2\pi r} F(S) + \\ &+ (\alpha_1 + \nu\alpha_2) T \cos \varphi; \\ \frac{d\vartheta}{dS} &= -\nu_2 \frac{\cos \varphi}{r} - \nu \sin \varphi + 12 \frac{1-\nu_1\nu_2}{E_1 h^3} \frac{\cos^2 \varphi}{r} (M_1 \cdot r) + (\alpha_1 + \nu\alpha_2) kT; \\ \frac{d}{dS} (r \cdot N) &= \frac{E_2 h}{r} \xi + \frac{\nu_2 \cos \varphi}{r} (r \cdot N) + \nu_2 \frac{\sin \varphi}{2\pi r} F(S) - r q_{r(S)} - E_2 \alpha_2 h T; \\ \frac{d}{dS} (r \cdot M_1) &= \frac{E_2 h^3 \cos^2 \varphi}{12r} \vartheta + \sin \varphi (r \cdot N) + \frac{\nu_2 \cos \varphi}{r} (r \cdot M_1) - \\ &- \frac{\cos \varphi}{2\pi} F(S) - \frac{E_2 \alpha_2 k T \cos \varphi h^3}{12}; \\ \frac{d\xi}{dS} &= -\nu_2 \frac{\sin \varphi}{r} \zeta + \cos \varphi \cdot \vartheta + \frac{1-\nu_1\nu_2}{E_1 H} \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{r} (r \cdot N) + \\ &+ \frac{1-\nu_1\nu_2}{E_1 H} \frac{\sin^2 \varphi}{2\pi r} F(\zeta) + (\alpha_1 + \nu_2 \alpha_2) T \sin \varphi, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\xi, \zeta$  – соответственно радиальное и осевое перемещения;  $\vartheta$  – угол поворота нормали;  $E_1, E_2$  – модули упругости;  $\nu_1, \nu_2$  – коэффициенты Пуассона;  $\zeta$  – расстояние по меридиану;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты линейного расширения;  $r$  – радиус параллельного круга;  $F(\zeta)$  – осевое усилие;  $q_{r(\zeta)}$  – радиальная составляющая нагрузки.

Система разрешающих линеаризованных уравнений решалась методом начальных параметров с ортогонализацией С.К. Годунова. В качестве тестовых расчетов использовались: расчет конической оболочки при постоянной температуре без коррозионного износа; расчет составной оболочки (конус, сфера, цилиндр) при постоянной температуре без коррозионного износа; расчет цилиндрической оболочки переменной толщины в температурном поле; расчет цилиндрической оболочки при постоянной температуре, внутреннем давлении и коррозионном износе. Выполненные расчеты показали применимость методики для моделирования поведения составных оболочек вращения произвольной формы, подвергающихся совместному действию нагрузки, температуры и коррозионной среды.

В конце главы рассмотрены вопросы оптимального проектирования круглой геометрически нелинейной пластины (рисунок 8) в условиях коррозионного износа, скорость которого зависит от уровня напряженно-деформированного состояния.

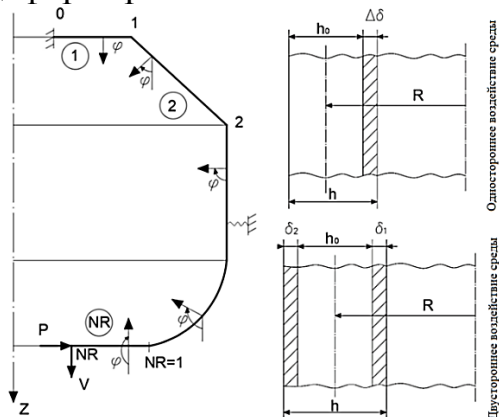


Рисунок 7 – Расчетная схема и случаи воздействия среды (одностороннее и двустороннее) на составную оболочку вращения

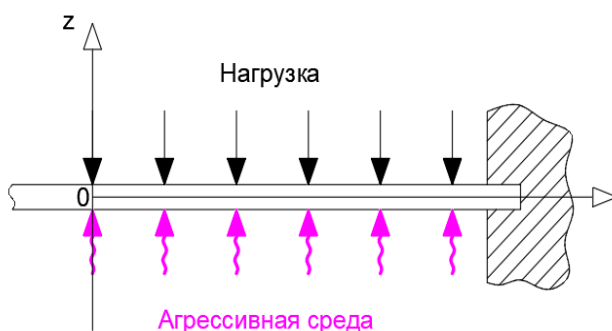


Рисунок 8 – Круглая геометрически-нелинейная пластина при воздействии на нее агрессивной среды

Были предложены две постановки задачи оптимального проектирования: 1) среди пластин равного начального объема  $V = V_c$  найти ту, которая удовлетворяет условию: наибольшая интенсивность напряжений  $\max_r \{\sigma_u\}_1$  достигает минимального значения в конце определенного срока службы  $T_{end}$ ; 2) из всех пластин равного начального объема  $V = V_c$  найти такую, в которой наибольшая интенсивность напряжений  $\max_r \{\sigma_u\}_1$  достигает предельного значения  $[\sigma]$  позднее всего.

В шестой главе рассматривается моделирование поведения армированных конструкций при совместном действии нескольких агрессивных сред. Построена модель деформирования дискретно-армированного материала (железобетона) в случае одновременного воздействия хлоридсодержащей среды и карбонизации.

В модели деформирования бетон рассмотрен как нелинейный, разномодульный материал со следующей диаграммой деформирования:

$$\sigma = \begin{cases} A_{0p}\chi_1(\mu)\psi_1(C)\varepsilon - B_{0p}\chi_2(\mu)\psi_2(C)\varepsilon^3 - F_{0p}\chi_3(\mu)\psi_3(C)\varepsilon^5 & \sigma \geq 0; \\ A_{0c}\chi_1(\mu)\psi_1(C)\varepsilon - B_{0c}\chi_2(\mu)\psi_2(C)\varepsilon^3 - F_{0c}\chi_3(\mu)\psi_3(C)\varepsilon^5 & \sigma < 0; \end{cases} \quad (17)$$

где  $\psi(C)$  – функция влияния хлоридной коррозии,  $C$  – концентрация хлоридов;  $\chi(\mu)$  – функция влияния карбонизации;  $\mu$  – параметр химического взаимодействия ( $0 \leq \mu \leq 1$ ). Кинетика изменения параметра  $\mu$  описывается логистическим уравнением

$$\frac{d\mu}{dt} = q\mu(1 - \mu), \quad (18)$$

со следующими начальными условиями:  $t=0$ ,  $\mu=\mu_0$ ,  $q$  – коэффициент, учитывающий свойства материала и интенсивность воздействия среды.

Модель коррозионного износа арматуры принималась в виде

$$\delta = \begin{cases} 0, & t \leq t_{inc}; \\ \alpha(t - t_{inc})^\beta, & t > t_{inc} \end{cases}, \quad (19)$$

где  $\delta$  – глубина коррозионного поражения арматуры;  $t_{inc}$  – время инкубационного периода. Карбонизации бетона приводит к уменьшению критической концентрации хлоридов, необходимой для начала коррозии арматуры, в два раза:  $C_{кр}^к = C_{кр}^н / 2$ .

В работе рассмотрена задача расчета сжимаемой конструкции (железобетонной опоры) (рисунок 9) при одновременном воздействии хлоридсодержащей среды и карбонизации.

Для данного случая модель представляет собой сочетание модели самой конструкции, модели одновременного воздействия хлоридной коррозии и карбонизации, модели деформирования материала с учетом вызванных хлоридной коррозией и карбонизацией изменений, а также модели коррозионного поражения арматуры и модели наступления предельного состояния. На рисунке 10 показана эпюра напряжений в бетоне опоры в начальный момент времени и при наступлении предельного состояния.

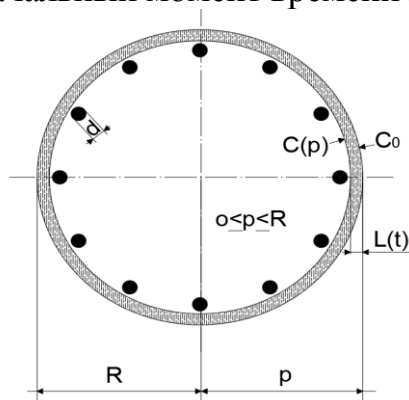


Рисунок 9 – Сжимаемая дискретно-армированная конструкция (железобетонная опора)

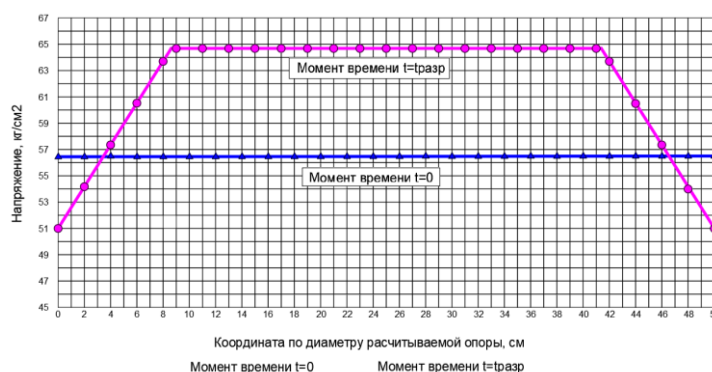


Рисунок 10 – Эпюра напряжений в бетоне опоры в начальный момент времени и при наступлении предельного состояния

**В седьмой главе** рассмотрены примеры моделирования поведения конструкций в агрессивной среде.

Сначала рассмотрено моделирование поведения армированных конструкций на упругом основании в условиях воздействия хлоридсодержащей среды (применительно к железобетонным дорожным плитам). Обобщенная расчетная модель в данном случае представляет собой совокупность моделей: конструктивного элемента, грунтового основания, материала, воздействия среды, наступления предельного состояния.

Для модели конструктивного элемента применена модель пластины по технической теории изгиба с соответствующими гипотезами; для модели грунтового основания применялась двухпараметрическая модель типа Власова – Леонтьева; предполагалось, что нагрузка статически приложена к



срединной плоскости. Для моделирования поведения железобетона применялась нелинейная деформационная модель, представляющая собой составную модель разномодульного нелинейного ортотропного материала. В данной модели соотношения, описывающие поведение элемента в плоском напряженном состоянии, складываются из физических соотношений для арматуры и бетона, который работает в условиях плоского напряженного состояния:

$$\sigma_x^b = \frac{\Psi_j}{1-\nu_j^2} (e_x + \nu_j e_y); \quad \sigma_y^b = \frac{\Psi_j}{1-\nu_j^2} (e_y + \nu_j e_x); \quad \tau_{xy}^b = \frac{\Psi_j}{2(1+\nu_j)} e_{xy}, \quad (20)$$

где  $\nu_j$  – коэффициент поперечной деформации,  $j = 1, 2$ ;  $\sigma_x^b, \sigma_y^b, \tau_{xy}^b$  – компоненты тензора напряжений,  $e_x, e_y, e_{xy}$  –  $e_x, e_y, e_{xy}$  – аналогично для деформаций,

$$\Psi_j = \frac{\Phi_j(e_u, C, \Pi)}{e_u}, \quad j = 1, 2,$$

$$\sigma_u^b = \Phi_j(e_u, C, \Pi) = [A_j^b(C) \cdot e_u - B_j^b(C) \cdot e_u^{m_j(C)}] / (1 + \lambda \Pi), \quad (21)$$

где  $A_j^b(C)$ ,  $B_j^b(C)$ ,  $m_j(C)$  – функции, которые учитывают влияние концентрации агрессивной хлоридсодержащей среды  $C$  на процесс деформирования бетона при растяжении ( $j = 1$ ) и сжатии ( $j = 2$ ), функция  $(1 + \lambda \Pi)$  учитывает влияние поврежденности  $\Pi$  на деформирование бетона.

Предполагается, что арматура для каждого направления армирования работает в одноосном напряженном состоянии, а ее коррозионный износ рассчитывается по следующей модели:

$$\delta = \begin{cases} 0, & t < t_u, \\ (\delta_K \cdot t) / (t + T), & t \geq t_u \end{cases}, \quad (22)$$

где  $\delta_K$  – максимальная глубина коррозии;  $T$  – некоторый параметр.

Уравнение накопления повреждений имеет вид

$$d\Pi/dt = a_j(C) [\sigma_u^b / (1 - \Pi)] v_j(C), \quad \Pi(0) = 0, \quad \Pi(t_p) = 1, \quad j = 1, 2, \quad (23)$$

где  $t_p$  – время до разрушения рассматриваемой точки (параметр поврежденности  $\Pi = 1$ ),  $a_j(C)$  и  $v_j(C)$  – коэффициенты уравнения, которые зависят как от концентрации агрессивной среды, так и от вида напряженного состояния в рассматриваемой точке.

Разрешающее нелинейное дифференциальное уравнение изгиба армированной пластины на упругом основании в условиях хлоридной коррозии:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ D_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ D_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[ D_3 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[ D_{21} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[ D_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \right) - 2m \nabla^2 W + nW = p(x, y). \quad (24)$$

Здесь  $W$  – прогиб,  $D_{ij}$  – сложные нелинейные функции различных параметров,  $m$ ,  $n$  – коэффициенты модели грунтового основания,  $p(x, y)$  – интенсивность нагрузки.

Чтобы определить характеристики напряженно-деформированного состояния рассчитываемой армированной пластины в каждый момент времени, нужно, решив уравнение диффузии, определить распределение  $C$  (концентрации агрессивной среды) по всему объему пластины в этот момент времени, по уравнениям (23) определить уровень накопления повреждений в точках объема пластины к рассматриваемому моменту времени, по уравнениям (22) определить уровень коррозионного повреждения арматуры к этому моменту времени, и далее решить уравнение (24) с соответствующими граничными условиями. Это позволит получить однозначное решение для каждого рассматриваемого случая, и далее определить напряжения и деформации в любой точке армированной пластины в рассматриваемый момент времени. Полученное дифференциальное уравнение изгиба армированной пластины на упругом основании в сочетании с уравнениями проникания хлоридсодержащей среды, уравнениями накопления повреждений в бетоне и уравнениями коррозионного износа арматуры позволяет рассчитывать пластины при разном характере нагружения, при разных схемах опирания пластины по контуру, разных программах воздействия хлоридсодержащей среды и определять время до разрушения.

Задача расчета пластины решается шагами по времени, и на каждом шаге для решения уравнения (24) применяется метод конечных разностей. С использованием разработанной методики исследовано поведения пластины для случаев, когда нагрузка действует статически, равномерно распределена по верхней поверхности пластинки, а агрессивная среда действует или на всю верхнюю поверхность пластинки, или на нижнюю поверхность пластинки, или же одновременно на обе поверхности пластины.

Ниже приведена кинетика увеличения во времени интенсивности деформаций для центральной и угловой точек на нижней (рисунок 11) и верхней (рисунок 12) поверхностях пластины.

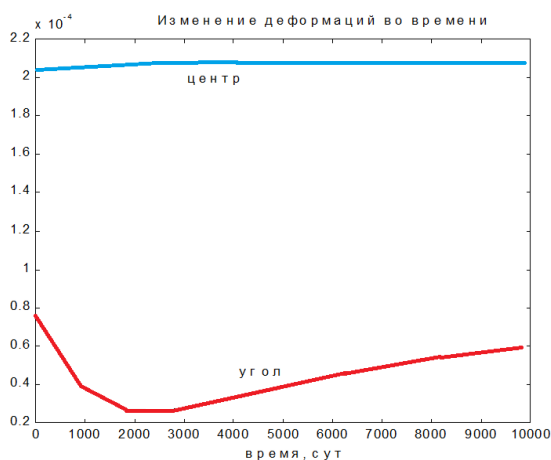


Рисунок 11 – Интенсивность деформаций на нижней поверхности рассчитываемой пластины

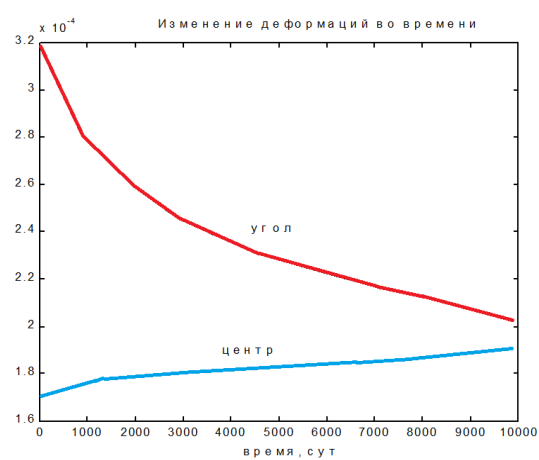


Рисунок 12 – Интенсивность деформаций на верхней поверхности рассчитываемой пластины

Затем в главе рассмотрено моделирование напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций, подверженных суммарному воздействию нагрузок, температур, агрессивной среды. В качестве примера была выбрана работа дорожной одежды на мостовом полотне. Подход к построению разрешающих уравнений и методика решения аналогичны вышерассмотренным. Выполнен расчет многослойной пластинчатой конструкции с учётом воздействия нагрузки и температуры. В процессе расчета установлено, что при больших нагрузках второе предельное состояние (по деформациям), связанное с нарушением сплошности, может быть достигнуто во внутреннем, скрытом от наружного наблюдения слое конструкции, что подтверждается экспериментальными данными.

В конце главы рассмотрен анализ армированных пластинчатых систем в условиях воздействия агрессивных сред (применительно к дорожным и канализационным трубам и шлюзовым камерам гидротехнических сооружений). Получены соответствующие уравнения деформирования, разработана методика расчета и проведены численные эксперименты по исследованию влияния хлоридов на кинетику разрушения этих конструкций.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ**

В работе развит общий подход к построению моделей деформирования и разрушения конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и физическими полями с учетом интенсифицирующего действия напряженно-деформированного состояния на кинетику их взаимодействия.

Этот подход позволил построить и применить к расчету конструкций следующие модели:

– модель коррозионного растрескивания конструкций в условиях низкотемпературного наводороживания, с использованием которой исследовано влияние схемы нагружения на характер напряженного состояния толстостенного трубопровода при действии нагрузки и наводороживании;

– конечно-элементная модель деформирования и разрушения толстостенных трубопроводов, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии, в условиях местного прогрева; с использованием этой модели был выполнен расчетный анализ напряженно-деформированного состояния и долговечности толстостенных трубопроводов, подверженных одновременному воздействию водородной коррозии, нагрузки, неоднородного температурного поля.

– модель деформирования и разрушения металлов, взаимодействующих с жидкометаллическими средами, с применением которой выполнено исследование поведения трубопровода, подвергающегося обезуглероживанию в жидком натрии;

– модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению, с ее идентификацией и верификацией;

– расчетные модели коррозионного растрескивания с использованием различных теорий накопления повреждений, с их идентификацией и верификацией;

– модели коррозионного разрушения пластинчатых и оболочечных элементов конструкций, учитывающие влияние напряженного состояния, температуры, агрессивной среды на скорость коррозии; с идентификацией и верификацией этих моделей по экспериментальным данным; с использованием моделей коррозионного износа исследовано поведение составных оболочек вращения, подвергающихся неравномерному нагреву и коррозионному износу;

– модель деформирования дискретно армированного материала в условиях совместного воздействия нагрузки, хлоридсодержащей среды и карбонизации, с использованием которой исследован эффект совместного действия карбонизации и хлоридсодержащей среды на армированные конструкции.

В работе сформулированы задачи оптимального проектирования тонкостенных конструкций, находящихся под воздействием агрессивных эксплуатационных сред.

Рассмотрены особые случаи работы конструкций в агрессивной эксплуатационной среде на примере дорожных сооружений (армированные конструкции на упругом основании, а также многослойные конструкции, работающие под одновременным воздействием нагрузок, температур, агрессивной эксплуатационной среды, водопропускные трубы и шлюзовые камеры).

**В работе получены следующие основные выводы:**

1. Вид и уровень напряженно-деформированного и поврежденного состояния конструкций оказывают значительное, чаще всего интенсифицирующее воздействие на кинетику взаимодействия конструкций с агрессивными средами и этот эффект оказывает значительное влияние на прочность и особенно долговечность конструкций, работающих в агрессивных условиях эксплуатации.

2. Водород при обычных температурах оказывает избирательное воздействие на материал конструкций так, что механические свойства не изменяются в сжатых зонах, но изменяются в растянутых, причем величина изменения зависит и от концентрации водорода, и от вида напряженного состояния в конкретной точке. Для одного и того же напряженного состояния большая концентрация водорода приводит к более сильному изменению механических свойств, а в случае одинаковой концентрации водорода более высокий уровень напряженного состояния вызывает более сильные изменения механических свойств.

Водород в условиях высокой температуры и давления в процессе взаимодействия с материалом конструкций вызывает водородную коррозию, при которой происходит обезуглероживание части сечения, приводящее к снижению и кратковременных (предел прочности, модуль

упругости, диаграмма деформирования, коэффициент поперечной деформации) и длительных (кривые ползучести, длительной прочности, предел пластичности, предельная деформация) характеристик в обезуглероженной зоне. На кинетику изменения механических характеристик значительное влияние оказывают температура и уровень поврежденности материала.

Жидкометаллические среды (натрий, литий, сурьма) оказывают деструктирующее воздействие на материал контактирующих с ними конструкций. В данном случае степень изменения как кратковременных, так и длительных механических характеристик материала совпадает с изменением концентрации углерода в конструкции.

Воздействие на конструктивные элементы радиационных сред дополнительно приводит к радиационному распуханию. Основопологающим фактором при этом является доза (интегральный поток) нейтронов. На уровень воздействия радиационного облучения влияют и уровень, и вид напряжённого состояния.

Коррозионное разрушение (коррозионный износ) вызывает значительное изменение геометрических параметров металлических конструктивных элементов, причем скорость коррозионного разрушения зависит от ряда факторов: вида и уровня напряженно-деформированного состояния, температуры, концентрации агрессивной среды, ориентации конструктивного элемента, наличия или отсутствия защитного покрытия на нем.

3. Развитый в работе подход к построению моделей деформирования и разрушения конструкций, опирающийся на теорию структурных параметров, оказался инвариантным к различным видам агрессивных сред (как физически, так и химически активных) и физических полей: с его помощью построены модели деформирования конструкций, подвергающихся коррозионному износу, низкотемпературному наводороживанию, высокотемпературной водородной коррозии, действию жидкометаллических сред, радиационных полей, а также модели деформирования армированных конструкций, подвергающихся хлоридной коррозии, совместному действию карбонизации и хлоридной коррозии.

4. Построенная модель деформирования материалов в водородосодержащей среде учитывает избирательное действие низкотемпературного водорода на механические характеристики материалов, приводящее к появлению наведенной и изменяющейся анизотропии по мере насыщения материала водородом. Избирательность выражается в зависимости величины наведенной анизотропии не только от концентрации водорода, но и от жесткости схемы напряженного состояния. В модели учитывается влияние вида и уровня напряженного состояния материала на кинетику проникания в него водородосодержащей среды. Приведенные соотношения достаточно корректно описывают поведение толстостенного трубопровода в условиях совместного действия нагрузки и наводороживания с учетом деструктирующего действия водорода и

позволяют учесть основные эффекты, сопровождающие взаимодействие трубопровода с водородом.

Анализ экспериментальных данных показал, что следует в обязательном порядке учитывать эффекты накопления повреждений, ползучести, влияния температуры на механические свойства материала при построении моделей деформирования и разрушения элементов конструкций, которые подвергаются действию высокотемпературной водородной коррозии в неоднородном тепловом поле. При моделировании поведения конструкций в водороде высоких параметров необходимо учитывать неоднородность и локальность действия поля температур.

5. Приведены два варианта модели деформирования материала в условиях обезуглероживания при контакте с жидкометаллическими средами, применяемыми в качестве теплоносителя в ядерных реакторах. Предложена методика идентификации построенной модели по экспериментальным данным. При помощи программного комплекса MATLAB выполнена идентификация модели и получены ее коэффициенты. Данная модель может применяться при прогнозировании поведения элементов конструкций, которые взаимодействуют с жидкометаллическими средами.

Модифицированный вариант модели деформирования и разрушения материалов дает возможность достоверно описывать экспериментальные данные по длительной прочности и ползучести, а также по длительной пластичности и ползучести на всех трёх стадиях кривых деформирования.

Идентификация модифицированной модели дает возможность полностью определить коэффициенты модели и по произвольному, и по некоторому минимальному набору экспериментальных данных. Верификация модифицированной модели показывает, что при найденных коэффициентах экспериментальные кривые ползучести, длительной прочности, длительной пластичности, достаточно корректно описываются как в обычных, так и в радиационных условиях.

6. Предложена модель коррозионного разрушения, учитывающая влияние напряженного состояния, температуры, агрессивной среды, разработана методика ее идентификации, по экспериментальным данным найдены коэффициенты модели. Показано, что модель достаточно корректно описывает экспериментальные данные и может использоваться для прогнозирования коррозионного износа при совместном действии указанных факторов. Получены основные соотношения, описывающие коррозионно-механическое поведение гибких нелинейно-упругих оболочек вращения в тепловом и силовом полях. Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния в оболочках вращения, подвергающихся совместному действию нагрузки, температуры и агрессивной среды, основанная на совместном использовании метода последовательных возмущений параметров и метода начальных параметров и ортогонализацией по С.К. Годунову. Выполненные расчеты показали применимость методики для моделирования поведения составных оболочек

вращения произвольной формы, подвергающихся совместному действию нагрузки, температуры и коррозионной среды.

7. Построенная модель взаимодействия нагруженной железобетонной конструкции с эксплуатационной средой, вызывающей одновременно хлоридную коррозию и карбонизацию, позволяет корректно описать деструктивные процессы в рассматриваемой конструкции. Методика расчета железобетонной стойки опоры при совместном воздействии хлоридсодержащей среды и карбонизации позволяет достаточно достоверно моделировать изменение ее напряженно-деформированного состояния. Данная методика также может быть применена для решения задач расчетного прогнозирования и других типов армированных конструкций, эксплуатируемых в средах, вызывающих и хлоридную коррозию, и карбонизацию. Выполненный расчетный анализ показал достаточно сильное разрушающее воздействие совместного влияния хлоридной коррозии и карбонизации на долговечность железобетонных конструктивных элементов. Таким образом, была доказана необходимость обязательного учета совместного воздействия хлоридсодержащих сред и сред, вызывающих карбонизацию, для прогнозирования поведения железобетонных конструкций в реальных условиях эксплуатации.

8. Предложенные постановки задач оптимального проектирования применительно к пластинчатым конструкциям, подвергающимся воздействию совокупности факторов (нагрузок, агрессивной среды), учитывают последствия воздействия агрессивной среды на конструкцию с течением времени (учет коррозионного износа). Анализ показывает, что проекты, оптимальные для конструкций без учета воздействия агрессивных сред, перестают быть таковыми при учете воздействия агрессивных сред; следовательно, при учете воздействия агрессивных сред постановки задач оптимального проектирования должны быть переформулированы вплоть до того, что на конструкцию, имеющую оптимальные характеристики в момент разрушения, следует накладывать обратное воздействие агрессивных сред в течение заданного срока эксплуатации, с тем чтобы определить характеристики конструкции в начальный момент времени.

Выполненные в диссертации исследования могут быть развиты в следующих направлениях:

- разработка методов прогнозирования поведения конструкций в агрессивных средах с учетом наличия защитных покрытий как на армирующих элементах, так и на самих конструкциях;
- моделирование поведения конструкций в агрессивных средах при динамическом нагружении конструкций;
- разработка методов активного управления поведением конструкций с помощью специальных сред, влияющих на свойства материалов, и разработка моделей, позволяющих прогнозировать поведение управляемых таким образом конструкций.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Основные публикации в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России**

(всего 51 статья в журналах и изданиях,  
рекомендованных ВАК **Минобрнауки России**)

1. **Овчинников, И.И.** Моделирование коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры с использованием теории длительной прочности А.Р. Ржаницына / И.И. Овчинников // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 2. – С. 19-24.

2. **Овчинников, И.И.** Расчет напряженно–деформированного состояния и поврежденности армированной пластины в хлоридсодержащей среде / И.И. Овчинников // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 3. – С. 3-9.

3. **Овчинников, И.И.** Экспериментальные исследования влияния профиля, диаметра арматуры и толщины защитного слоя бетона на характеристики коррозионного поражения арматуры в поперечных трещинах железобетонных элементов / И.И. Овчинников, В.Н. Мигунов // Известия ОрелГТУ. Строительство и реконструкция. – 2010. – № 5 (31). – С. 24-31.

4. **Овчинников, И.И.** Напряженно деформированное состояние и долговечность прямоугольной железобетонной трубы при действии агрессивной среды / И.И. Овчинников, М.И. Калиновский // Строительные материалы. – 2010. – № 10. – С. 88-89.

5. **Овчинников, И.И.** Долговечность железобетонных конструкций транспортных сооружений / И.И. Овчинников // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 60-62.

6. **Овчинников, И.И.** Моделирование процесса появления коррозионных трещин в железобетонных элементах конструкций в условиях хлоридной агрессии / И.И. Овчинников // Региональная архитектура и строительство. – 2011. – № 1 (10). – С. 72-79.

7. **Овчинников, И.И.** Напряженно-деформированное состояние и долговечность толстостенного трубопровода в условиях воздействия неоднородного теплового поля и водородной коррозии / И.И. Овчинников // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 4. – С. 16-20.

8. **Овчинников, И.И.** Применение конечно–элементного программного комплекса ANSYS к расчету толстостенного трубопровода, подвергающегося неоднородной водородной коррозии / И.И. Овчинников, С.А. Бубнов // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2012. – № 4 (91). – С. 5-8.

9. **Овчинников, И.И.** Построение и идентификация модели деформирования и разрушения металлов, взаимодействующих с жидкометаллической средой / И.И. Овчинников // Наукоедение: Интернет-журнал. – 2012. – № 3. – 9 с.



10. **Овчинников, И.И.** Моделирование поведения стержневого элемента, взаимодействующего с жидкометаллической средой / И.И. Овчинников // Наукоеведение: Интернет-журнал. – 2012. – № 3. – 8 с.

11. **Овчинников, И.И.** Влияние программы нагружения на коррозионно-механическое поведение круглых пластинок / И.И. Овчинников // Наукоеведение: Интернет-журнал. – 2012. – № 4. – 6 с.

12. **Овчинников, И.И.** Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание / И.И. Овчинников // Наукоеведение: Интернет-журнал. – 2012. – № 4. – 30 с.

13. **Овчинников, И.И.** Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников // Наукоеведение: Интернет-журнал. – 2012. – № 4. – 28 с.

14. **Овчинников, И.И.** Моделирование процессов деформирования и разрушения металлов с учетом кинетики обезуглероживания / И.И. Овчинников // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 6. – С. 13-18.

15. **Овчинников, И.И.** Проблема оптимального проектирования нагруженных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред (обзор) / И.И. Овчинников, А.В. Бочкарев, А.А. Занин, Д.Г. Зеленцов, Л.И. Короткая // Наукоеведение: Интернет-журнал. – 2012. – № 4. – 21 с.

16. **Овчинников, И.И.** Деформирование и разрушение стержневого элемента, подвергающегося обезуглероживанию в жидкометаллической среде / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 1. – С. 70-73.

17. **Овчинников, И.И.** Модели деформирования и замедленного разрушения материалов в водородсодержащей среде / И.И. Овчинников // Вестник СГТУ. – 2013. – № 2 (70). – Вып. 1. – С. 178-183.

18. **Овчинников, И.И.** Моделирование поведения длинного полого цилиндра в водородсодержащей среде, диффузионные характеристики которой зависят от напряженного состояния / И.И. Овчинников // Вестник СГТУ. – 2013. – № 2 (70). – Вып. 1. – С. 183-191.

19. **Овчинников, И.И.** Модифицированная модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению / И.И. Овчинников // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 1. – С. 29-35.

20. **Овчинников, И.И.** Коррозионно-механическое поведение оболочек вращения в силовом и температурном поле / И.И. Овчинников, В.С. Мавзовин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – № 1 (31). – С. 38-43.

21. **Овчинников, И.И.** К вопросу о моделировании деформирования магистральных трубопроводных конструкций с учетом воздействия агрессивной среды / И.И. Овчинников, В. Б. Караханян // Вестник Евразийской науки. – 2023. – № 1. – 14 с.

**Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах  
данных Web of Science и Scopus**

22. Иванов, А.В. Моделирование кинетики проникания агрессивного агента в объем конструктивных элементов / А.В. Иванов, **И.И. Овчинников** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2006. – № 43. – С. 167-174.

23. Бубнов, С.А. Исследование разрушения и кинетики обезуглероживания толстостенной трубы в условиях водородной коррозии / С.А. Бубнов, **И.И. Овчинников**, А.А. Бубнов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2012. – № 2 (27). – С. 178-182.

24. **Овчинников, И.И.** Применение нелинейной деформационной модели для анализа поведения армированных пластин на упругом основании, взаимодействующих с хлоридсодержащей средой. Основные соотношения / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 1 (36). – С. 27-38.

25. **Овчинников, И.И.** Вероятностное моделирование несущих железобетонных конструкций предприятий текстильной промышленности при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды / И.И. Овчинников, Тао Чэнь, И.Г. Овчинников // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2017. – № 5(371). – С. 209-215.

26. **Ovchinnikov, I. I.** Numerical Modeling of Local Penetration of Chloride Containing Medium into Construction Elements Made of Reinforced Concrete / I.I. Ovchinnikov, O.V. Snezhkina, I.G. Ovchinnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – P. 1-6. – doi:10.1088/1757-899X/262/1/012041

27. **Ovchinnikov, I.I.** Simulation of corrosion with the influence of the Stress-strain state, temperature and concentration of aggressive environment on the corrosion rate / I.I. Ovchinnikov, O.V. Snezhkina, I.G. Ovchinnikov // Ponte. Florence. Italy. International Journal of Sciences and Research. – 2017. – №3. – Vol.73. – P. 295-301.

28. Lakhdari, A.A. Numerical modeling of hydrogen embrittlement of a hollow cylinder / A.A. Lakhdari, A. Seddak, **I.I. Ovchinnikov** et al. // Jordan J. of Mechanical and Industrial Engineering. – 2018. – V.12. – № 1. – P. 7-18.

29. Lakhdari, A.A. Finite element modeling of the behavior of a hollow cylinder in a hydrogen-containing environment / A.A. Lakhdari, A. Seddak, **I.I. Ovchinnikov** et al. // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2020. – V.14. – № 51. – P. 236-253.

30. **Ovchinnikov, I.I.** Probabilistic Assessment of the Durability of Reinforced Concrete Piles under Chloride Aggression / I.I. Ovchinnikov, O.V. Snezhkina, I.G. Ovchinnikov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 5 p. – doi:10.1088/1757-899X/753/2/022072.

31. **Ovchinnikov, I.I.** Modeling the stress-strain state of a circular plate subject to general corrosion according to various models / I.I.Ovchinnikov, V.S. Mavzovin // E3S Web of Conferences. – 2021. – 8 p. – doi.org/10.1051/e3sconf/202126303009.

32. **Ovchinnikov, I.I.** Analysis of the kinetics of damage to the reinforced plate in a chloride-containing medium / I.I. Ovchinnikov, V.S. Mavzovin // AIP Conference Proceedings. – 2023. – 8 p. – doi.org/10.1063/5.0103601.

### **Основные статьи и материалы конференций**

33. **Овчинников, И.И.** Длительная прочность прямоугольной армированной пластины в условиях хлоридной агрессии / И.И. Овчинников // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2007.– С. 89-93.

34. **Овчинников, И.И.** Влияние хлоридной коррозии на кинетику образования и развития коррозионных трещин в армированных конструкциях / И.И. Овчинников // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2008.– С. 57-64.

35. **Овчинников, И.И.** Современное состояние проблемы расчета армированных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред / И.И. Овчинников // Строительство уникальных зданий и сооружений Интернет-журнал. – 2012. – № 2. – 60 с.

36. **Овчинников, И.И.** Напряженно-деформированное состояние круглой пластинки, подвергающейся коррозионному износу, скорость которого зависит от напряжений / И.И. Овчинников // Фундаментальные и прикладные проблемы механики деформируемого твердого тела, математического моделирования и информационных технологий: сб. по материалам Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – Ч. 1. Механика деформируемого твердого тела. – Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2013. – С. 227-231.

37. **Овчинников, И.И.** Моделирование поведения толстостенного трубопровода взаимодействующего с жидкометаллической средой / И.И. Овчинников // Актуальные проблемы городского строительства: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 322-331.

38. **Овчинников, И.И.** Модель деформирования железобетонных конструкций в условиях совместного воздействия карбонизации и хлоридной коррозии / И.И. Овчинников, Тао Чэнь, И.Г. Овчинников // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ – 2016): сб. тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: КГАСУ, 2016. – С. 61.

39. Чэнь, Тао Вероятностное моделирование железобетонных мостовых конструкций при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды / Тао Чэнь, **И.И. Овчинников**, И.Г. Овчинников // Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ – 2016): сб. тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: КГАСУ, 2016. – С. 85.

### Монографии по теме диссертационной работы

40. Кабанин, В.В. Моделирование коррозионного растрескивания оболочечных конструкций / В.В. Кабанин, В.С. Мавзовин, **И.И. Овчинников**, С.Н. Мавзовина. – Саратов: Изд-во СГУ, 2006. – 124 с.

41. **Овчинников, И.И.** Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами / И.И. Овчинников, Г.А. Наумова. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2007. – 272 с.

42. Кабанин, В.В. Прочность оболочек вращения, подвергающихся коррозионному износу в неоднородном поле температур / В.В. Кабанин, Г.А. Наумова, **И.И. Овчинников**. – Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2007. – 108 с.

43. **Овчинников, И.И.** Моделирование напряженного состояния и разрушения толстостенных трубопроводов в условиях водородной коррозии и неоднородного теплового поля / И.И. Овчинников, А.А. Бубнов, С.А. Бубнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 135 с.

44. Бубнов, С.А. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния и поврежденности трубчатых элементов конструкций, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии / С.А. Бубнов, **И.И. Овчинников**, А.А. Бубнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 156 с.

45. Овчинников, И.Г. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания / И.Г. Овчинников, А.И. Ликверман, **И.И. Овчинников** и др. – Саратов: КУБиК, 2014. – 504 с.

46. **Овчинников, И.И.** Идентификация и верификация моделей коррозионных и деформационных процессов / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2014. – 164 с.

47. **Овчинников, И.И.** Моделирование кинетики деформирования армированных конструкций в специальных эксплуатационных средах / И.И. Овчинников, В.Н. Мигунов, И.Г. Овчинников. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 280 с.

48. Мигунов, В.Н. Экспериментально-теоретическое моделирование армированных конструкций в условиях коррозии / В.Н. Мигунов, **И.И. Овчинников**, И.Г. Овчинников. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 352 с.

49. Бубнов, С.А. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния и поврежденности трубчатых элементов конструкций, подвергающихся высокотемпературной водородной коррозии / С.А. Бубнов, А.А. Бубнов, **И.И. Овчинников**. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 156 с.

Подписано в печать 13.09.2023

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 2,0

Уч.-изд. л. 1,8

Тираж 150 экз.

Заказ 43

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел.: 8 (8452) 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru