

УДК 539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АГРЕССИВНЫХ СРЕД (ОБЗОР)***

© 2018 г.

Локощенко А.М., Фомин Л.В.

*НИИ механики Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*

fleonid1975@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2017

Предлагается обзор ряда научных работ в области моделирования процессов взаимодействия агрессивной среды с материалами и элементами конструкций и их поведения под действием нагрузок. Исследуемые явления описываются с использованием теоретико-экспериментальных методов для дальнейшего прогнозирования кратковременных и длительных прочностных характеристик материалов и элементов конструкций, подверженных влиянию агрессивной среды. Ввиду сложности рассматриваемых явлений используется междисциплинарный научный подход, учитывающий как физико-химическое взаимодействие агрессивной среды с материалами, так и систематизацию механико-математических (феноменологических) моделей. Основное внимание при этом уделяется изучению и моделированию высокотемпературного коррозионного разрушения материалов и элементов конструкций. Учитывается диффузионное проникновение агрессивной среды и химическое взаимодействие ее элементов с материалом. Представлены исследования влияния на процессы коррозии различных факторов: жидкометаллических сред и радиационного облучения; пленки окислов, образующейся на поверхности, подверженной коррозии; растрескивания под напряжением нержавеющей сталей в условиях водородного охрупчивания, а также исследования зависимости скорости коррозии от напряженного состояния при упругопластических деформациях. Приведены публикации с различными вариантами феноменологических моделей процессов коррозионного износа, потери пластичности и охрупчивания в агрессивных средах, публикации, использующие вероятностно-статистический подход к моделированию коррозионного разрушения. Предложен обширный список известных литературных источников, которые отражают научные исследования с учетом различных аспектов взаимодействия материала с агрессивной средой.

Ключевые слова: моделирование, физико-химические модели, механико-математические модели, агрессивная среда, жидкометаллическая среда, прочность, коррозия, коррозионный слой, коррозионное разрушение, диффузия, химическая реакция, ионизирующее излучение, эксперимент.

* Выполнено при поддержке РФФИ (грант №17-08-00210а).

Введение

Эксплуатация реальных конструкций может происходить в самых разнообразных условиях и средах, зачастую в той или иной мере агрессивных по отношению к материалу конструкции. Эти среды могут быть природными, техногенными или смешанными. Отдельные агрессивные компоненты этих сред могут диффундировать в объем материала и вступать в физическое и/или химическое взаимодействие с ним. Это взаимодействие может приводить к изменению эксплуатационных свойств материала и конструкции в целом. Агрессивная среда оказывает значительное влияние на механические, физические, химические, электротехнические и другие характеристики материала.

Воздействие агрессивной среды на металл определяется также видом ее агрегатного состояния – это может быть жидкая среда, газообразная среда и плазма. Примером жидкой среды может служить жидкометаллический теплоноситель в контуре энергетического реактора, его воздействие может вызывать коррозионное растрескивание материала элементов оборудования атомных электростанций (АЭС). При высоких температурах агрессивной становится даже обычная воздушная среда, вызывающая в этом случае высокотемпературную газовую коррозию. Ионизирующее излучение также можно считать агрессивной средой, так как радиационные эффекты влияют на кристаллическую решетку металлов и в результате происходит набухание металла, а влияние ионизирующего излучения на полимеры характеризуется изменением их структурных элементов.

Предлагаемый обзор научных исследований посвящен анализу существующих подходов, методов и решений в этой важной области прочности материалов и конструкций, контактирующих со средой. Эти исследования имеют как фундаментальное, так и прикладное значение и широко используются при проектировании элементов конструкций, подверженных влиянию агрессивных рабочих и окружающей внешней сред. Первоочередность фундаментального подхода связана с построением механико-математических моделей, основанных на определяющих и кинетических уравнениях и описывающих процессы деформирования и разрушения конструкций и процессы взаимодействия материала и конструкций с указанными средами. Идентификация этих моделей, то есть определение значений коэффициентов (материальных параметров) в этих уравнениях и подбор подходящих материальных функций, основывается на обработке экспериментальных данных, в результате решения полученной совокупности уравнений проводится анализ поведения конструкций в различных условиях.

В настоящем обзоре особое внимание уделяется влиянию агрессивной среды на высокотемпературную кратковременную и длительную прочность материалов и элементов конструкций, что существенно влияет на длительную работоспособность конструкций в целом и безопасность их эксплуатации в течение всего срока службы. Степень важности безопасной эксплуатации конструкций, в том числе применяемых в нефтехимическом машиностроении и атомной энергетике, не подлежит сомнению, а нарушения в этих областях могут приводить к техногенным авариям и, как следствие, возможным экологическим катастрофам. Поэтому технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера входят в перечень критических технологий и приоритетных направлений развития науки, техники и технологий, утвержденных Президентом Российской Федерации [1].

1. Взаимодействие физических и химических процессов в металлах

Исследованию взаимодействия физических и химических процессов в металлах посвящены монографии А.Н. Фрумкина с соавторами [2], Ю.Р. Эванса [3], Э.М. Гутмана [4], Н. Биркса и Дж. Майера [5], А. Веста [6, 7], Г.Г. Улига и Р.У. Реви [8], И.В. Семеновой с соавторами [9] и др. Кроме того, некоторые данные по физике твердого тела, химическим процессам, коррозионным взаимодействиям можно получить из справочных изданий [10–12]. Исследования вышеназванных авторов основываются на глубоком атомно-молекулярном изучении физико-химических процессов в материале при воздействии на него активной среды, в частности на учете ионных потоков (анионно-катионных процессов) и движения электронов, участвующих в коррозионных процессах. Авторы строят физико-химические модели, которые связывают основные термодинамические и физико-химические параметры изучаемых процессов. Эти модели устанавливают зависимость между параметрами окружающей среды (температурой, влажностью, химическим составом среды, продолжительностью воздействия и т.д.) и параметрами коррозионного процесса. Как отмечают И.Г. Овчинников и Г.А. Наумова [13], особенностью физико-химических моделей является их строгая индивидуальность. Для конструкций из других материалов, с другими формами и размерами поперечных сечений, находящихся в иных районах с другими параметрами внешней среды, с другими защитными покрытиями и используемые модели могут дать существенно отличающиеся результаты.

Физико-химические модели процессов взаимодействия агрессивной среды с материалами позволяют перейти к построению механико-математических (феноменологических) и структурных моделей. Эти модели позволяют прогнозировать рассматриваемые явления и учитывать их влияние на макромеханическое поведение материалов и элементов конструкций под действием нагрузок с учетом агрессивного воздействия среды.

2. Феноменологический подход при моделировании процессов взаимодействия агрессивной среды с материалами и элементами конструкций

Для того чтобы перейти к построению механико-математических (феноменологических) моделей, необходимо выбрать феноменологические параметры, изменение которых можно было бы наблюдать во время эксперимента, или структурные параметры – так называемые кинетические параметры процесса взаимодействия материала и проникающей в него среды. Введение кинетических параметров в модели позволяет провести описание реальных экспериментальных данных с помощью рассматриваемой математической модели при различных программах температурно-силового нагружения. К феноменологическим параметрам можно отнести толщину слоя δ материала, который уже подвергнут деструктивному влиянию среды (например, коррозионный износ), а к кинетическим параметрам, по мнению некоторых авторов, относят толщину слоя δ , параметр коррозионной поврежденности ω , концентрацию элементов агрессивной среды c в металле и др.

2.1. Работы, учитывающие толщину коррозионного слоя δ . К «пионерским» работам, в которых исследуется коррозионный износ, можно отнести работы А.И. Кикина [14] и В.М. Долинского [15]. В.М. Долинский в своих научных работах использует «механохимическую» модель коррозионного износа, в которой использу-

ется зависимость скорости коррозии от уровня механического растягивающего напряжения. В частности, автор [15] предлагает решение задачи прочностного расчета тонкостенной оболочки, подвергающейся сплошной коррозии, скорость которой считается функцией интенсивности напряжений. Далее такой подход В.М. Долинский [16] распространил на прочностной анализ оболочек, трубчатых аппаратов и круглых пластин, используемых в нефтехимии и энергетике. В этих работах показано, что неравномерность поля напряжений приводит к неравномерному коррозионному износу.

В этом разделе обзора рассматриваются виды моделей коррозионного износа и конкретные соотношения, которые не учитывают природу взаимодействия агрессивной среды с материалом конструкции, и не имеет значения, происходит ли физическое проникновение агрессивного вещества в сплошную среду или это проникновение сопровождается химическим взаимодействием и превращениями. Значения материальных параметров в феноменологических моделях определяются на основе обработки конкретных экспериментальных данных.

Для параметра δ предложено много различных моделей. Так, в монографии [13] приведены примеры таких математических моделей, все коэффициенты, используемые в этих моделях, неявно зависят от компонентов тензора напряжений σ_{ij} . Дополнительно авторы группируют механико-математические модели, в которых явно учитывается влияние напряженного состояния σ_{ij} на кинетику коррозионного износа элементов конструкций. В приведенных в [13] зависимостях $\delta = \delta(t)$ все входящие величины, кроме δ , времени t , температуры T и характеристик напряженно-деформированного состояния, представляют собой материальные функции и коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным.

Указанные механико-математические модели имеют универсальный характер, они могут быть использованы для научных и инженерных расчетов прогноза изменения характерных размеров элементов конструкций, несущей способности и поведения конструкции при воздействии на нее агрессивной окружающей и/или рабочей сред.

В статье [17] проводится систематизация различных моделей взаимодействия материалов с агрессивной средой. В публикациях [18, 19] предложен банк моделей, учитывающих явление коррозии. В предлагаемом банке содержится информация о видах моделей, значениях коэффициентов моделей, областях применения моделей. Кроме того, в [18, 19] даны рекомендации по работе с разными моделями, данные о конструкциях, рассчитанных с использованием моделей, и библиография работ, в которых встречаются конкретные модели.

В конце 1970-х – начале 1980-х годов Э.М. Гутман с соавторами [4, 20–22] исследовали долговечность сосудов высокого давления в условиях механохимической коррозии (скорость коррозии зависит от напряженного состояния) при упруго-пластических деформациях. Авторы также проводили экспериментальные и теоретические исследования напряженно-деформированного состояния пластин в условиях чистого изгиба в коррозионной среде и определяли прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа. В этих работах предполагается, что скорость коррозии экспоненциально зависит от среднего напряжения, что, по мнению И.Г. Овчинникова, не всегда справедливо [23]. Следует отметить статьи В.Г. Карпунина с соавторами [24, 25], в которых учитывается различие скоростей коррозии на разных поверхностях изгибаемых пластин и оболочек. Отмечается, что при умень-

шении толщины пластин вследствие коррозионного износа прогибы и углы поворота могут стать большими, а напряжения могут превысить предел текучести материала. Авторами получены уравнения, описывающие процесс коррозионного разрушения гибких прямоугольных пластин и пологих оболочек из упругопластического материала с учетом несимметричности толщины относительно поверхности приведения. Учет физической и геометрической нелинейности в ряде случаев существенно уточняет описания деформирования и разрушения пластин и оболочек.

Большой вклад в развитие прочностного расчета пластин, оболочек, толстостенных труб и других элементов конструкций, подверженных коррозионному износу, внесла саратовская школа механиков под руководством И.Г. Овчинникова и В.В. Петрова.

И.Г. Овчинников с соавторами разработали методологию построения и исследования расчетных моделей конструкций, подвергающихся деструктирующему воздействию агрессивных сред, построили ряд моделей конструкций, подвергающихся коррозионному износу, воздействию водорода высоких и низких параметров, радиационному облучению, воздействию жидкометаллических сред. В [26] ими предложена логистическая модель коррозионного износа, основанная на логистическом уравнении:

$$\frac{d\delta}{dt} = \alpha\delta\left(1 - \frac{\delta}{\beta}\right), \quad \delta(0) = 0,$$

где α , β – параметры. В статье [27] И.Г. Овчинников предложил энергетическую модель коррозионного разрушения, инвариантную к виду напряженного состояния. Эта инвариантная особенность модели позволяет идентифицировать ее параметры в одних условиях, а использовать в других условиях деформирования материала.

В статьях Ю.Г. Прониной [28–31] рассматриваются задачи механохимической коррозии, в которых задаются соотношения для $d\delta/dt$ в виде эмпирических зависимостей от напряжения и температуры для наружных и внутренних поверхностей толстостенных труб и полых сфер. В этих задачах учитывается возможность затухания коррозии во времени при образовании плотной пленки окислов (например, по экспоненциальному закону). Полученные изменения толщин учитываются при решении задачи Ламе. Для оценки долговечности дополнительно учитывается накопление повреждений, определяемых как отношение текущего максимального главного напряжения к пределу прочности.

Во многих работах наряду с параметром δ используется параметр коррозионной поврежденности ω . Значение параметра коррозионной поврежденности ω изменяется от $\omega = 0$ в начальный момент времени до $\omega = \omega^*$ в момент разрушения (обычно принимается $\omega^* = 1$). В общем случае кинетическое уравнение для параметра ω имеет следующий вид:

$$\frac{d\omega}{dt} = F(\omega, \sigma, T), \quad (1)$$

где t – время, σ – напряжение, T – температура.

Уравнение (1) используется во многих публикациях И.Г. Овчинникова с соавторами [32–38], посвященных исследованию ползучести и длительной прочности элементов конструкций с учетом влияния агрессивной среды. Так, в [32, 35] исследуется поведение прямоугольных пластинок, подвергающихся высокотемпературному окислению в условиях ползучести. В [33, 34] определяется длительная прочность

пластинок и оболочек в условиях коррозионного износа. В [36–38] выводятся основные соотношения, описывающие ползучесть и длительную прочность пластинки, подвергающейся окислению. Здесь подробно исследуются закономерности окисления и способы его описания, идентификация некоторых моделей, описывающих кинетику окисления, основные соотношения, описывающие ползучесть и длительную прочность пластинки, подвергающейся окислению, алгоритм расчета ползучести пластинки, подвергающейся окислению. Рассматриваются различные феноменологические модели изменения толщины окисленного слоя $\delta(t)$ и кинетические соотношения для накопления коррозионных повреждений, имеющие вид (1). Коэффициенты в этих моделях определяются на основе обработки экспериментальных данных. Накопление повреждений учитывается в основных соотношениях ползучести и длительной прочности, а изменение толщины пластины учитывается в постановке задачи. Дополнительно исследуется влияние различных факторов, в том числе влияние вида нагрузки и закрепления, на кинетику накопления повреждений и коррозионный износ прямоугольной пластинки. Расчет конструкций с учетом совместного действия нагрузок, температур и коррозионного износа предлагается в статьях [36–40].

На протяжении 25 лет в Научно-исследовательском институте механики МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством А.М. Локощенко проводятся систематические исследования влияния агрессивной среды на ползучесть и длительную прочность металлов [41–43]. Эти исследования основаны на применении кинетической концепции Ю.Н. Работнова [44]. Анализ проводится с помощью введения двух зависящих от времени и пространственных координат параметров: один из них – поврежденность материала, в качестве второго параметра принимается толщина разрушенного поверхностного слоя или концентрация специфических характеристик окружающей среды в металле.

В 1995–97 гг. А.М. Локощенко проанализировал известные экспериментальные данные по длительной прочности образцов с различными значениями поперечных размеров и обнаружил значительный масштабный эффект, проявляющийся в том, что образцам большей толщины соответствует большее значение времени до разрушения при одной и той же величине растягивающего напряжения. Этот эффект А.М. Локощенко описал на основе изучения коррозии металлов, характеризуемой разрушением поверхностного слоя металлов, возникающего на всех боковых поверхностях испытываемых образцов [45–47]. Им был предложен метод оценки влияния поперечных размеров образцов на длительную прочность, который основан на учете различной роли поверхностных и внутренних слоев металла в реальных испытаниях. Были введены понятия «сильного» и «слабого» масштабных эффектов. Предложены различные варианты систем кинетических уравнений относительно поврежденности материала и толщины разрушенного слоя, позволяющие качественно и количественно описывать различные особенности проявления масштабного эффекта.

2.2. Работы, учитывающие диффузионное проникновение агрессивной среды в материал. Как известно, математические модели физических явлений описываются с помощью уравнений математической физики [48]; как правило, это дифференциальные уравнения в частных производных. Так, например, процесс физической диффузии по типу Фика описывается параболическим уравнением в частных производных [48]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div} (D \text{grad } c), \quad (2)$$

где c – концентрация среды в материале, t – время, D – коэффициент диффузии.

А.М. Локощенко с учениками используют приближенный метод решения уравнения диффузии, основанный на введении диффузионного фронта агрессивной среды в материале [41–43, 49–54]. Основа этого метода заключается во введении диффузионного фронта, разделяющего невозмущенную и возмущенную области рассматриваемого тела, и в определении движения границы между этими областями. Показана высокая точность и эффективность предлагаемого метода. Этот метод позволяет представить решение уравнения диффузии в удобной для анализа форме. Получена система уравнений, описывающих взаимодействие диффузионного и коррозионного фронтов в процессе ползучести. Приведены решения типовых задач при различных граничных условиях. Предложен упрощенный вариант данного метода, в котором накопление поврежденности материала во времени зависит от интегрально среднего (в объеме тела) значения концентрации элементов окружающей среды в металле. Предложен критерий длительной прочности, связывающий времена разрушения в присутствии и в отсутствие агрессивной окружающей среды. В статье [55] приведено описание так называемого запирающего эффекта, при котором плотный слой проникших в материал посредством диффузии элементов среды приводит к практическому прекращению диффузионного процесса.

А.М. Локощенко и Л.В. Фомин применили этот метод при решении задач растяжения, изгиба, нестационарного сложного напряженного состояния стержней и пластин при ползучести с учетом влияния агрессивной среды [51–54, 56–59]. Наряду с наиболее распространенной степенной зависимостью скорости деформации ползучести и скорости накопления поврежденности от напряжения в этих работах используется дробно-степенная модель ползучести и длительной прочности, предложенная ранее С.А. Шестериковым и М.А. Юмашевой [60].

А.М. Локощенко, А.А. Ильин, А.М. Мамонов и В.В. Назаров [61–64] провели экспериментально-теоретическое исследование ползучести и длительной прочности двухфазного титанового сплава ВТ6 с предварительно внедренным водородом. Были проведены испытания растягиваемых образцов на ползучесть вплоть до разрушения в широком диапазоне значений напряжений и уровней концентрации водорода. Испытания показали, что увеличение доли предварительно внедренного водорода приводит к систематическому уменьшению скорости ползучести, увеличению времени до разрушения и, как правило, к уменьшению предельной деформации в несколько раз. Исследование структуры исходных и испытанных образцов показало, что предварительное внедрение водорода в двухфазный сплав ВТ6 приводит к значительному перераспределению долей α - и β -фаз в сплаве, именно это обстоятельство является причиной изменения механических характеристик сплава вследствие внедрения водорода. С помощью кинетического подхода получено хорошее соответствие экспериментальных и теоретических кривых ползучести вплоть до разрушения.

В.И. Астафьев и Л.К. Ширяева [65, 66] на основе обобщенного подхода Работнова – Качанова предложили математическую модель упругопластического деформирования металлов в агрессивных средах, которое приводит к потере пластичности и охрупчиванию металлов. Предложенные определяющее и кинетическое соотношения позволили описать ряд общих закономерностей растрескивания под на-

пряжением и водородного охрупчивания. В [65, 66] исследована зависимость этих закономерностей от скорости деформирования, величины содержания водорода и вида напряженного состояния.

А.М. Локощенко и Д.А. Кулагин [55, 67–70] предложили теорию ползучести и длительной прочности, учитывающую влияние агрессивной окружающей среды, которая основана на вероятностном подходе. Предложено подробное описание модели при рассмотрении длительной прочности растягиваемого стержня с поперечным сечением в виде узкого прямоугольника. Принимается, что стержень состоит из большого количества плотно уложенных очень тонких пластин. Принята гипотеза о вероятности разрушения этих пластин, которая зависит от осевого напряжения и концентрации в материале стержня элементов окружающей среды, причем плотность неразрушенных пластин возрастает по направлению от боковой поверхности стержня к его середине, при этом появляется неоднородное поле осевых напряжений (с максимумом вдоль оси стержня). Уменьшение количества неразрушенных пластин приводит к увеличению напряжения в каждой пластине и, в итоге, – к полному разрушению стержня. Рассмотрены возможности вероятностного подхода для стержня при чистом изгибе, толстостенной трубы под внутренним давлением, цилиндрической оболочки при двухосном растяжении и др. В [71] рассмотрена длительная прочность растягиваемого цилиндрического стержня с помощью вероятностной модели.

И.Г. Овчинников [72] предложил диффузионную модель коррозионного разрушения (с применением параметра коррозионной поврежденности ω), которая экспериментально обоснована в статье [73].

2.3. Работы, учитывающие химическое взаимодействие агрессивной среды с материалом. В.В. Петров, И.Г. Овчинников и В.К. Иноземцев в монографии [74], кроме концентрации c и поврежденности ω , дополнительно рассматривают кинетический параметр химического взаимодействия q , изменяющийся от 0 (перед началом химической реакции) до 1 (в конце реакции) и определяемый кинетическим уравнением

$$\dot{q} = \alpha c^\beta. \quad (3)$$

В этом случае входящие в кинетическое уравнение для поврежденности

$$\dot{\omega} = \frac{A\sigma^n}{(1-\omega)^m} \quad (4)$$

величины A , n , m зависят от q .

В ряде случаев рекомендуется для более точного описания экспериментальных данных использовать вместо (3) уравнение

$$\dot{q} = aq(1-q). \quad (5)$$

И.Г. Овчинников и В.В. Петров [75] сравнивают характерные скорости процессов диффузии $V_{\text{дифф}}$ и химической реакции $V_{\text{хим}}$, анализируют последствия существенного различия этих скоростей и предлагают вводить движущийся фронт изменения механических характеристик. Параметр химического взаимодействия q и разделение областей материала (в данном случае полимера) на различные кинетические области в зависимости от соотношения скорости диффузии $V_{\text{дифф}}$ и скорости химического взаимодействия $V_{\text{хим}}$ рассматриваются в статье [76]. В зависимости от

упомянутых факторов исследуются три области, в которых происходит деструкция материала и выполняется одно из трех неравенств: $V_{\text{хим}} \gg V_{\text{дифф}}$, $V_{\text{дифф}} \gg V_{\text{хим}}$ или $V_{\text{дифф}} \approx V_{\text{хим}}$.

В [77, 78] для анализа влияния водородной коррозии на механические свойства вместо $\omega(t)$ вводится интегральный параметр $q(t)$ химического взаимодействия металла с водородной средой. Все коэффициенты, входящие в определяющие уравнения, заменяются на функции $q(t)$. Под $q(t)$ понимается кусочно-постоянная функция времени t , зависящая от двух параметров: продолжительности инкубационного периода (в течение которого механические свойства материала не меняются) и времени до завершения химических превращений в материале.

При учете химического взаимодействия агрессивной среды с материалом логично было бы модифицировать параболическое уравнение диффузии (2), вводя в него дополнительные слагаемые, учитывающие дополнительные источники или стоки проникающего в материал вещества, которые возникают при химических превращениях и поглощениях вещества в процессе химических реакций. В качестве таких дополнительных слагаемых могут вводиться скорости этих потоков, то есть скорости изменения концентрации во времени. Одна из известных работ по этой теме написана британским ученым. Монография J. Crank [79] посвящена описанию диффузионных процессов в терминах решений дифференциальных уравнений. Автор приводит различные модификации уравнения диффузии, естественное обоснование их получения (на основе физических и химических принципов, балансов веществ) и методы решения таких модифицированных уравнений. Кроме этой книги, авторам настоящей статьи неизвестны подобные исследования в этом научном направлении.

В статье [75] подробно рассматривается взаимодействие физико-химических процессов с помощью параметров c и q с использованием системы уравнений, состоящей из уравнения (5) и модифицированного уравнения диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \text{div} (D \text{grad} c) - kc, \quad (6)$$

где $k = \text{const}$ – характерная скорость химической реакции, c – скорость распада химических связей под действием агрессивной химической среды.

В [80] И.Г. Овчинников и А.Б. Рассада исследовали деформирование сплошной среды, взаимодействующей с водородосодержащей средой, модифицированное уравнение диффузии в этом случае учитывает градиент напряжений в сплошной среде ($D = \text{const}$):

$$\dot{c} = D \nabla^2 c - \frac{DV}{RT} \nabla c \cdot \nabla \sigma_{\text{ср}} - \frac{DV}{RT} c \nabla^2 \sigma_{\text{ср}}. \quad (7)$$

Здесь c – концентрация молекулярного водорода, V – мольный объем, R – газовая постоянная, $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее нормальное напряжение. Компоненты тензоров напряжений и деформаций связаны соотношениями, коэффициенты которых зависят от c и характеристики вида напряженного состояния $\xi = 3\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{и}}$ ($\sigma_{\text{и}}$ – интенсивность напряжений).

Существенные результаты исследований влияния агрессивной среды с учетом физического и химического взаимодействия и фазовых превращений получены А.Б. Фрейдиным в последние 30 лет. Среди публикаций автора за последние пять лет можно

отметить статьи [81–85]. В них рассматривается развитие механико-математических моделей для описания влияния механических напряжений на кинетику химических реакций в деформируемых телах. При этом учитывается физико-химическое обоснование описываемых подходов, в частности, используются уравнения химических реакций, которые происходят на границах раздела твердых фаз (металл, оксид) и газообразных веществ. Модели учитывают влияние как внешних, так и порождаемых химическими реакциями внутренних напряжений. Исследуется влияние вида напряженного состояния, величин и знаков напряжений на протекание химических реакций. Исследуется устойчивость распространения фронта химической реакции в напряженном теле. Рассматриваются кинетика фронта реакции в окрестности концентраторов напряжений и взаимосвязи химических реакций с процессами разрушения. С учетом химической реакции, локализованной на фронте реакции в открытой системе деформируемое тело – газообразная компонента, записывается баланс массы, импульса и энергии, после чего выводится выражение для энтропии, позволяющее естественным образом получить формулу для тензора химического сродства, с помощью которого определяются как химическое равновесие, так и кинетика фронта превращения. Обсуждается также запирающий эффект – блокирование реакции напряжениями на фронте химической реакции. Проводится сравнение условий на межфазной границе и на фронте химической реакции. Формулируется задача о деформируемом твердом теле с неизвестной внутренней границей, положение которой в случае термодинамического равновесия согласно принципу Гиббса минимизирует энергию тела. В работах А.Б. Фрейдина показано, что на термодинамически равновесной границе равенство скалярных химических потенциалов заменяется равенством нормальных компонент тензора химического потенциала, в роли которого выступает тензор напряжений Эшелби, поделенный на плотность материала в отсчетной конфигурации [86–88].

На протяжении последних шестидесяти лет в Физико-механическом институте им. Г.В. Карпенко НАН Украины ведется плодотворное исследование влияния окружающей среды на характеристики металлов при высоких температурах (Г.Г. Максимович, Н.П. Дрозд, В.Н. Федирко, В.С. Павлина, Я.С. Матычак, Т.С. Тарлупа и др.). Основная особенность теоретических работ этой группы ученых заключается в исследовании взаимосвязи деформационных процессов с адсорбцией, диффузией, химическими реакциями, теплопроводностью и т.д. Ученые проводят анализ взаимодействия процессов диффузионного насыщения и протекания внутренней химической реакции, с этой целью они рассматривают систему уравнений диффузии с дополнительными членами и с помощью метода Лапласа получают ее решение. Это решение позволяет исследовать стадию однородного образования химических комплексов и выявить их влияние на кинетику перераспределения диффундирующих элементов. В статье [89] предложенный метод распространен на дополнительное описание сублимации легирующих элементов с одновременным распадом химических соединений в сплавах.

Значительный интерес представляют работы ученых из Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Например, в статье С.А. Капустина с соавторами [90] предложены вариант модели и алгоритмы моделирования на основе метода конечных элементов процессов коррозионного растрескивания под напряжением элементов конструкций, работающих в условиях агрессивного воздействия коррозионно-активной среды. При построении модели коррозионного растрескивания

под напряжением (КРН) рассматривается нестационарный процесс изменения состояния конгломерата из оксидной пленки, защищающей основной металл от агрессивного воздействия коррозионной среды, самого металла, состояние которого определяется уровнем действующих напряжений, температуры, временем воздействия и концентрацией коррозионной среды, а также параметрами, характеризующими историю необратимого деформирования и текущую поврежденность материала. Процесс возникновения и развития КРН представляется как результат взаимодействия разрушения защитных пленок на поверхности металла, анодного растворения металла и образования новой оксидной пленки. Для оценки работоспособности предложенных моделей и алгоритмов проведено численное моделирование процесса разрушения тонкостенного трубчатого образца, частично погруженного в жидкую хлорсодержащую среду, в условиях осевого растяжения.

Технологический аспект управления коррозионной стойкостью титановых сплавов рассмотрен в статье В.Н. Чувильдеева с соавторами [91], где описаны результаты исследований структуры, физико-механических свойств и коррозионной стойкости нано- и микрокристаллического (НМК) титанового сплава ПТЗВ системы Ti-Al-V. Установлено, что управление структурой титанового сплава путем равноканального углового прессования позволяет повысить в 2 раза прочность сплава и одновременно до 4 раз его стойкость к межкристаллитной горячесолевой коррозии (в сравнении с аналогичными показателями того же сплава, обработанного по стандартной технологии). Показано, что повышение прочности обеспечивается за счет измельчения зеренной структуры, а повышение коррозионной стойкости связано с диффузионным перераспределением коррозионно-активных примесей на границах зерен. Таким образом, равноканальное угловое прессование представляет собой перспективный инструмент обработки титановых сплавов, эксплуатирующихся в составе конструкций в агрессивных средах.

Во всех вышеуказанных работах использовался детерминированный подход с изучением влияния среды и расчетом элементов конструкций, подверженных этому влиянию. При случайном характере коррозионного процесса значительный интерес представляет вероятностно-статистический подход к моделированию коррозионного разрушения. Необходимость такого подхода отмечалась в работе А.Р. Ржаницына [92]. Следует также отметить статьи В.Я. Флакса, И.А. Прыткина [93–95], в которых с использованием этого подхода определялись напряженно-деформированное состояние и долговечность конструкций, подвергающихся воздействию коррозионных сред. В работах С.А. Тимашева [96, 97] оценивалась надежность пластин и оболочек, подвергающихся коррозионному износу. В статьях В.Д. Райзера с соавторами [98–101] уделяется большое внимание разработке теории надежности конструкций, подвергающихся коррозионному износу. В статье Р.Г. Маннапова [102] показано, что распределение глубин коррозионных повреждений подчиняется закону Вейбулла – Гнеденко, в его же статьях [103, 104] выявлены вид функции распределения глубин по поверхности металлов и характер изменений во времени определяющих параметров.

Р.А. Арутюнян [105] исследовал проблему разрушения тонкостенной оболочечной конструкции вследствие питтинговой коррозии, при этом принималось, что начальное распределение питтингов по поверхности конструктивного элемента и время появления первого отверстия являются случайными. Глубина питтингов контролируется процессами электрохимической коррозии. Вычисляется функция надежности

ти и формулируется критерий разрушения (образования первого коррозионного отверстия), учитывающий механохимические процессы разрушения.

В области строительства и архитектуры решению задач оптимального проектирования с дополнительным учетом вероятностного характера отказа конструкций, подверженных влиянию агрессивной среды, посвящены работы И.Г. Овчинникова [106], Р.М. Магомедова [107], А.Ж.М. Siemes и др. [108], в которых рассматриваются оптимизация и надежность железобетонных конструкций и трубопроводов.

3. Влияние ионизирующего излучения на деформационно-прочностные характеристики материалов и элементов конструкций

Отдельный интерес представляет исследование влияния ионизирующего излучения на деформационно-прочностные характеристики материалов и элементов конструкций. Влияние ионизирующего излучения заключается в появлении радиационных дефектов кристаллической решетки металлов и распухании металла (увеличение объема металла при воздействии на него ионизирующего излучения). В статье И.И. Овчинникова, И.Г. Овчинникова и М.Ю. Богиной [109] рассматриваются особенности методологии построения моделей деформирования и разрушения материалов в условиях радиационного облучения с использованием теории кинетических параметров Ю.Н. Работнова [44]. Приводятся модели, описывающие изменение дозы облучения (флюенса) нейтронного потока по объему конструктивного элемента, а также модели, описывающие радиационные деформации (распухание) материала. Анализируются результаты экспериментов по влиянию типа и вида напряженного состояния на радиационное распухание и ползучесть материалов.

В обзоре [110] показано:

1. В зависимости от вида материалов радиационные среды приводят к различному изменению кратковременных и длительных механических характеристик материалов, а также к радиационному распуханию.

2. Фактором, оказывающим влияние на механические характеристики материалов, является доза или интегральный поток нейтронов. Так как уровень дозы облучения распределяется неравномерно по сечению (толщине) конструкции и может изменяться с течением времени, то влияние радиационного (нейтронного) облучения приводит к появлению наведенной и изменяющейся с течением времени неоднородности механических свойств.

3. Под влиянием радиационного облучения изменяются диаграмма деформирования металла, величины предела прочности и предела текучести, а также предельное удлинение.

4. Влияние облучения при высоких температурах приводит к ускорению процессов ползучести и накопления повреждений в металлах и сплавах и, как следствие, к сокращению долговечности облученных конструкций. При этом на степень воздействия радиационного облучения влияние оказывает не только уровень, но и вид напряженного состояния, что следует учитывать при построении расчетных моделей деформирования и разрушения.

Обзор основных моделей и методов расчета конструкций, подвергающихся радиационному облучению, представлен в [111]. Отмечается, что необходимо учитывать влияние радиационного воздействия на прочностные, пластические характеристики и особенно на ползучесть. Рассмотрим кратко некоторые модели, приведенные в указанной статье.

В статье В.С. Ленского [112] отмечается, что при воздействии радиационных потоков происходит существенное изменение механических свойств по объему, что требует уточнения существующих и разработки новых теорий и методов расчета элементов конструкций. Вводится гипотеза о том, что интенсивность потока нейтронов убывает по мере удаления на расстояние z от поверхности тела по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-\mu z},$$

где I_0 – интенсивность потока, проходящего через единицу площади поверхности; μ – константа материала, зависящая от температуры.

Согласно другой гипотезе, изменения механических свойств материала в каждой точке зависят от дозы облучения в этой точке (и от температуры) и не зависят от изменений в других точках. Величина дозы облучения в точке (x, y, z) учитывается в функции Ω , имеющей такой же смысл, как функция $\omega(\epsilon_i)$ в соотношениях теории малых упругопластических деформаций.

В статье А.А. Ильюшина и П.М. Огибалова [113] подход, аналогичный предложенному в [112], используется для расчета толстостенных цилиндрических оболочек с учетом радиационного облучения и с дополнительным учетом влияния интенсивности потоков нейтронов на изменение объема материала.

В монографии И.С. Куликова и Б.Е. Тверковкина [114] предложены математические модели для определения напряженно-деформированного состояния тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) быстрых газоохлаждаемых реакторов, с использованием которых получены расчетные данные по работоспособности ТВЭЛов быстрого реактора на диссоциирующем газе. В других работах И.С. Куликова с соавторами рассматриваются теоретические исследования работоспособности ТВЭЛов быстрого реактора БРИГ-300, распухание цилиндрического сердечника ТВЭЛа быстрого реактора, прочностной расчет ТВЭЛа быстрого реактора при жестком контакте топлива и оболочки. В [115] исследуется напряженно-деформированное состояние оболочки, причем для моделирования деформаций ползучести используется теория течения с учетом радиационной ползучести. В соотношениях, учитывающие радиационную ползучесть, вводится приращение функции радиационного распухания оболочки, которое влияет на приращение компонентов тензоров напряжений и деформаций.

Большой вклад в исследование и развитие моделей деформирования и разрушения облучаемых сталей внесли Г.С. Писаренко и В.Н. Киселевский с сотрудниками [116]. В работах этих авторов указывается, что условия эксплуатации наиболее ответственных элементов активных зон реакторов, в частности тепловыделяющих сборок, таковы, что в процессе выгорания топлива, как правило, изменяется абсолютный уровень действующих в них напряжений при сохранении вида напряженного состояния. Плавное перераспределение напряжений не вызывает существенного поворота главных осей. Отмечается, что в таких условиях учет анизотропии упрочнения сталей при переходе к пространственной системе не вносит заметных уточнений по сравнению с теорией изотропного упрочнения, и, исходя из простоты и удобства, для получения технических решений достаточно использовать уравнение состояния (феноменологическую модель) изотропного тела.

Экспериментальные исследования [117, 118] показывают, что нейтронное облучение, существенным образом воздействуя на структуру материала, изменяет кинетику его деформирования. Поэтому, если ползучесть происходила под облучением, для полноты системы определяющих параметров в нее вводился параметр ζ ,

учитывающий влияние облучения на структуру материала, причем в общем случае он должен интегрально учитывать интенсивность облучения, его энергетический спектр и накопленную дозу облучения. Уравнение состояния в общем виде имеет следующий вид:

$$\dot{p} = f(\sigma, T, p, \omega, \zeta),$$

где \dot{p} – скорость деформации ползучести, T – температура, p – деформация ползучести, ω – параметр поврежденности.

В работах Б.З. Марголина с соавторами [119, 120] установлено, что нейтронное облучение приводит к увеличению скорости ползучести, снижению длительной прочности и пластичности материала. На основании анализа экспериментальных данных предложена модель межзеренного разрушения аустенитных сталей, учитывающая влияние нейтронного облучения на длительную прочность и пластичность. Разработаны методики идентификации построенных моделей, и на сталях X18H10T и X18H9 проведена их верификация. Разработана методика прогнозирования циклической прочности аустенитных сталей при различных температурах, учитывающая влияние скорости деформирования и нейтронного облучения, и проведена ее верификация. Разработанные подходы применимы для прогнозирования кинетики развития трещин во времени при различных интенсивностях потока нейтронов и с учетом накопленного флюенса.

Большой вклад в развитие экспериментально-теоретического исследования влияния ионизирующего излучения на напряженно-деформированное состояние и процессы разрушения внесли ученые из Нижнего Новгорода (академик Ф.М. Митенков, профессор Ю.Г. Коротких и др.) [121]. В статье в качестве одного из основных механизмов деградации конструкционных материалов оборудования и систем ядерных энергетических установок (ЯЭУ) рассматривается радиационное охрупчивание корпусных сталей в зонах интенсивного нейтронного облучения. На базе современных достижений механики поврежденной среды и механики разрушения разработаны математические модели, алгоритмы и программы для расчета процессов неизотермического упругопластического деформирования и накопления усталостных повреждений в материале опасных зон оборудования и систем ЯЭУ. Разработанные модели позволяют учитывать влияние на скорость процессов накопления повреждений многоосности напряженного состояния, вращения главных площадок тензоров напряжений и деформаций, учитывать нелинейное суммирование повреждений при изменении режимов нагружения. Эти модели наряду с экспериментальными методами исследования технического состояния материала использовались для создания методики оценки выработанного и прогноза остаточного ресурсов оборудования и систем ЯЭУ по заданной истории эксплуатационного нагружения, положенной в основу системы эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР). Рассмотрены технология и основные задачи ЭМР на различных этапах жизненного цикла ЯЭУ: проектирования, изготовления, монтажа, эксплуатации, продления назначенных сроков службы и ресурса.

В статье С.А. Капустина с соавторами [122] дано описание методических и программных средств исследования процессов упруговязкопластического деформирования конструкций ЯЭУ, изготовленных из стали типа X16H11M3, в условиях термо-радиационных воздействий и представлены результаты их верификации на основе зависимостей деформирования этого материала, полученных в ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург).

В монографии Г.М. Хажинского [123] рассмотрено деформирование и разрушение металла оборудования ядерных реакторов при радиационных и термических воздействиях. Сопоставлены данные по термической и радиационной ползучести, обсуждено изменение механических свойств и набухание материала при нейтронном облучении. Рассмотрено влияние охлаждающей среды на коррозионную устойчивость и стресс-коррозию аустенитной стали. Проанализированы особенности циклического деформирования в условиях нейтронного облучения. Рассмотрен коррозионный рост трещин при постоянной и циклической нагрузках. Сформулированы критерии разрушения для различных условий работы металла. Автором приведено феноменологическое описание опытных данных при термической и радиационной ползучести. Предложены кинетические уравнения для сложного нагружения, а также методика расчета нестационарных задач термопластичности. Даны рекомендации по практическому использованию полученных результатов.

Различные аспекты влияния агрессивной среды на характеристики деформирования и разрушения современных металлов и сплавов рассматриваются в большом количестве монографий [2–10, 13, 41–43, 66, 74, 77, 79, 92, 97, 114, 116, 123–136 и др.] и журнальных статей, в том числе обзорного характера, например [110, 111, 137, 138].

4. Экспериментальные работы

Статьи сотрудников ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург) [139–141] связаны с экспериментальным исследованием ползучести и длительной прочности материалов и элементов конструкций оборудования атомных электростанций, находящихся в контакте с жидкометаллической агрессивной средой. Далее в настоящей статье приводится обзор этих работ с акцентированием внимания на полученных исследователями экспериментальных зависимостях характерных параметров коррозионного процесса и длительной прочности от времени.

А.С. Кудрявцев, В.Г. Марков и В.С. Лаврухин [141] рассмотрели вопросы длительной прочности конструкционных материалов, работающих в реакторной установке с жидкометаллическим свинцовым теплоносителем. Рабочая температура жидкометаллического теплоносителя на основе свинца превышает 500 °С, то есть находится в диапазоне температур, при которых в сталях могут интенсивно протекать процессы ползучести. Авторы статьи отмечают, что недостатком теплоносителей на основе свинца является их агрессивность по отношению к конструкционным материалам [139], мерой по борьбе с этой агрессивностью является поддержание определенной концентрации кислорода в жидком теплоносителе. В результате на поверхности стали образуется оксидная пленка, предотвращающая контакт материала с жидкометаллическим теплоносителем. Приведены экспериментальные данные, полученные при испытаниях образцов марок сталей 10X15H9C3Б и 10X9HСМФБ на длительную прочность на воздухе и в потоке жидкого свинца. Металлографический анализ показал, что при высоком уровне напряжений на образцах имеются следы фронтальной жидкометаллической коррозии, что приводит к снижению длительной прочности сталей при контакте с жидким свинцом. При уменьшении уровня напряжений на образцах наблюдается плотная оксидная пленка, сплошность которой нарушается тем сильнее, чем ближе она к месту разрушения образца. Эта пленка защищает образец от агрессивного воздействия окружающей среды, причем ее толщина зависит от уровня напряжений и длительности кон-

такта с жидким металлом. В статье приведена таблица скорости окисления исследуемого металла под нагрузкой и без нагрузки; кроме того, приведен график зависимости толщины оксидной пленки от длительности испытаний образцов указанных двух марок сталей при температуре 550 °С. Авторы отмечают, что первоначально предполагалось, что снижение длительной прочности в этом случае обусловлено уменьшением сечения образца за счет процессов окисления. Однако при более длительных испытаниях прямая зависимость степени снижения длительной прочности от уменьшения площади сечения образца не отмечалась. Более детальное исследование множества трещин на поверхности оксидных пленок с помощью растрового микроскопа с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа показало, что эти трещины проходят не только сквозь оксидную пленку, но и сквозь слой внутреннего окисления металла, причем их вершины являются местом контакта внутреннего слоя материала и свинцового жидкометаллического теплоносителя. В заключении статьи отмечено, что снижение длительной прочности образцов, испытанных в жидком свинце, при высоких уровнях напряжений обусловлено процессами фронтальной жидкометаллической коррозии, при более низких – совокупным влиянием процессов окисления, образования трещин в оксидной пленке и проникновения в них жидкого свинца. При использовании результатов испытаний образцов без следов фронтальной жидкометаллической коррозии прогнозировать длительную прочность материалов, работающих в жидкометаллическом теплоносителе на основе свинца, можно с помощью линейной экстраполяции аналогично прогнозированию длительной прочности материалов, работающих на воздухе.

В статье А.С. Кудрявцева с соавторами [140] исследовано влияние жидкометаллического свинцового теплоносителя на ползучесть хромистой мартенситной стали марки 10Х9НСМФБ. При проведении испытаний на длительную прочность отмечена повышенная скорость ползучести стали в контакте с жидким свинцом при температуре 550 °С по сравнению со скоростью ползучести на воздухе. Авторы отмечают, что в целом скорость ползучести образцов, испытанных в потоке жидкого свинца, превышает скорость ползучести образцов, испытанных на воздухе. Однако, если при высоком уровне напряжений этот эффект наблюдается непосредственно в начале испытаний (рис. 1а), то снижение уровня напряжений приводит к совпадению кривых ползучести на первой и частично на второй стадиях ползучести (рис. 1б). Начавшееся после испытаний в течение 10 тыс. часов ускорение ползучести свидетельствует не о начале третьей стадии ползучести, а об изменении ее скорости на второй стадии.

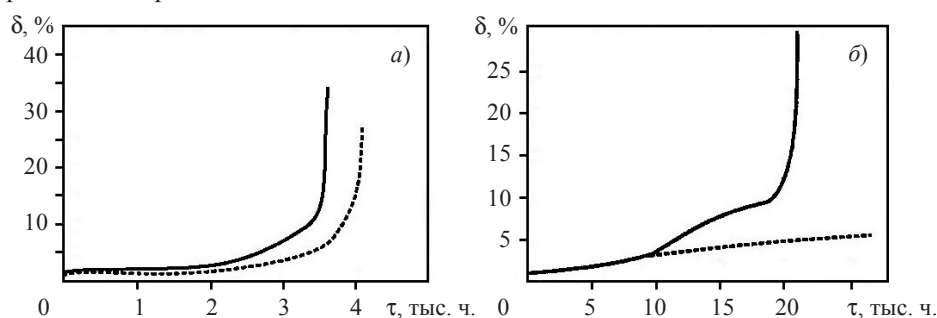


Рис. 1. Кривые ползучести стали марки 10Х9НСМФБ при температуре 550 °С в потоке жидкого свинца (сплошные линии) и на воздухе (пунктирные линии): а) напряжение 98 МПа ($\sigma/\sigma_{0,2}^{550\text{ °С}} = 0,321$); б) напряжение 68,6 МПа ($\sigma/\sigma_{0,2}^{550\text{ °С}} = 0,225$)

Авторы объясняют, что различное поведение кривых ползучести образцов, испытанных в контакте с жидким свинцом и на воздухе при уровне напряжений 98 МПа и 68,6 МПа, а также данные металлографического анализа образцов, разрушенных в потоке жидкого свинца, свидетельствуют о наличии двух принципиально различных механизмов разрушения образцов при контакте со свинцовым теплоносителем. Это явление, обнаруженное авторами [141], связано с влиянием уровня напряжений на устойчивость оксидных пленок. В статье рекомендуется для повышения надежности реакторной установки с жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца при расчете максимально допустимых напряжений в конструкциях, работающих в контакте с жидким свинцом, учитывать пределы ползучести конструкционных материалов, вводя ограничения по допустимой деформации на выбранной временной базе.

В статье Л.И. Огородова и А.С. Белова [142] приведены результаты экспериментально-теоретического исследования длительной прочности сплава ЭИ893ВД при кусочно-постоянных напряжениях в двухкомпонентной агрессивной среде, а именно, как в воздушной среде, так и в солевой газовой среде. Агрессивность среды характеризуется коэффициентом солевой нагрузки k_s , представляющим собою весовое количество солей, оседающих на единицу площади на поверхности элемента конструкции в единицу времени. Учет влияния агрессивной среды на длительную прочность осуществляется в [142] введением коэффициента k_s в определяющие уравнения. Этот метод хорошо описывает экспериментальные данные, полученные в случае агрессивной среды одного и того же состава, однако он не подходит для анализа результатов испытаний одного и того же сплава в агрессивных средах различного состава.

В статье Р.А. Кязимовой и Э.Т. Багирова [143] (Институт математики и механики Национальной академии наук Азербайджана) предложена эмпирическая формула, которая позволяет аналитически описывать экспериментальные кривые коррозионного разрушения под напряжением и учитывает влияние температуры. Сформулирована система опытов с целью определения универсальных констант системы металл – коррозионная среда. Представлены результаты обработки опубликованных в литературе некоторых экспериментальных данных по коррозионному разрушению. Приведены экспериментальные и расчетные кривые коррозионной прочности α -латуни в растворе аммиака (плотность 0,94 г/см³), армировочной бетонной проволоки в 10%-ном растворе роданистого аммония и мартенситной стали (0,14% С) в 80%-ном растворе нитрата кальция.

Заключение

Проведенный обзор исследований по моделированию процессов взаимодействия агрессивной среды с материалами и элементами конструкций показал широкое разнообразие подходов и методов теоретико-экспериментальных исследований в актуальной и важной области взаимодействия материалов элементов конструкций и внешних воздействий, влияющих на их эксплуатационные свойства. Сложность рассматриваемых явлений, широта их многоуровневой реализации обуславливает самый главный вывод: междисциплинарность научных подходов к изучению этих явлений. Такие междисциплинарные научные подходы влекут за собой необходимость построения адекватных физико-химических и механико-математических (феноменологических) моделей, позволяющих описать явление, выделить основные

параметры, влияющие на процессы взаимодействия материала и агрессивных сред, и построить адекватные модели, которые позволят спрогнозировать поведение материалов, отдельных элементов и конструкции в целом в течение всего срока эксплуатации. Предлагаемые исследователями механико-математические модели должны базироваться на основных гипотезах механики деформируемого твердого тела и дополнительно учитывать физико-химические процессы, происходящие в материале.

В результате проведенного обзора авторы настоящей статьи отмечают следующие основные направления и подходы, которые представляют особый интерес для дальнейшего научного развития. Это упомянутый ранее научный подход британского ученого J. Crank [79], учитывающий модификацию классического параболического уравнения диффузии (2). Интересен подход И.Г. Овчинникова [76], учитывающий конкуренцию распространения (различие скоростей диффузии и химической реакции) областей диффузионного проникновения и химического превращения агрессивной среды в материале. Кроме того, представляет научный интерес для дальнейшего развития подход И.Г. Овчинникова и В.В. Петрова [75], в котором используется параметр химического взаимодействия. Также важна работа И.Г. Овчинникова и А.Б. Рассада [80], учитывающая градиент напряжений в модифицированном уравнении диффузии водородосодержащей среды. Также представляют значительный интерес статья С.А. Капустина с соавторами [90] об учете поверхностных явлений, влияющих на нестационарное состояние коррозионной пленки при коррозионном растрескивании под напряжением.

Необходимо отметить, что в настоящей статье отражена лишь часть множества публикаций, которые определяют основные научные направления по рассматриваемой проблематике.

Список литературы

1. Указ Президента Российской Федерации №899 от 7 июля 2011 г. «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».
2. Фрумкин А.Н., Багоцкий В.С., Иофа З.А., Кабанов Б.Н. *Кинетика электродных процессов*. М.: Изд-во МГУ, 1952. 320 с.
3. Эванс Ю.Р. *Коррозия и окисление металлов. Теоретические основы и их практическое применение*. М.: Машгиз, 1962. 256 с.
4. Гутман Э.М. *Механохимия металлов и защита от коррозии*. М.: Metallurgia, 1981. 281 с.
5. Биркс Н., Майер Дж. *Введение в высокотемпературное окисление металлов*. М.: Metallurgia, 1987. 184 с.
6. Вест А. *Химия твердого тела. Теория и приложения*. В 2 ч. Ч. 1. М.: Мир, 1988. 558 с.
7. Вест А. *Химия твердого тела. Теория и приложения*. В 2 ч. Ч. 2. М.: Мир, 1988. 336 с.
8. Улиг Г.Г., Ревы Р.У. *Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику*. Л.: Химия, 1989. 456 с.
9. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. *Коррозия и защита от коррозии*. М.: Физматлит, 2002. 336 с.
10. *Коррозия*. Справочник. Под ред. Л.Л. Шрайера. М.: Metallurgia, 1981. 632 с.
11. *Физическая энциклопедия*. В 5 т. Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988–1998.
12. *Химическая энциклопедия*. В 5 т. Гл. ред. И.Л. Кнунянц, Н.С. Зефирова. М.: Советская энциклопедия, 1988–1998.
13. Овчинников И.Г., Наумова Г.А. *Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений*. Саратов: СГТУ, 2000. 227 с.

14. Кикин А.И. Особенности проектирования и расчета стальных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивной среды. *Металлические материалы и конструкции*. Сб. трудов МИСИ. М. 1962. №43. С. 8–16.
15. Долинский В.М. Расчет нагруженных труб, подверженных коррозии. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1967. №2. С. 9–10.
16. Долинский В.М. Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии. *Исследование по теории оболочек*: Сб. трудов КИСИ. Казань. 1976. Вып. 7. С. 37–42.
17. Овчинников И.Г. О методологии построения моделей конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами. *Долговечность материалов и элементов конструкций в агрессивных и высокотемпературных средах*. Межвуз. научн. сб. СПИ. Саратов. 1988. С. 17–21.
18. Овчинников И.Г., Дворкин М.С., Сабитов Х.А. Банк математических моделей коррозионного износа, применяемых для прогнозирования поведения металлоконструкций. *Проблемы прочности материалов и конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами*. Межвуз. научн. сб. СГТУ. Саратов. 1993. С. 141–150.
19. Овчинников И.Г., Кудайбергенов Н.Б., Дворкин М.С. Моделирование кинетики коррозии металлоконструкций с использованием банка математических моделей коррозии. *Проблемы повышения надежности и долговечности конструкций зданий и сооружений*. Сб. научн. тр. Казахского химико-технологического института. Шымкент. 1993. С. 9–25.
20. Гутман Э.М., Зайнуллин Р.С., Зарипов Р.А. Долговечность сосудов высокого давления в условиях механохимической коррозии. *Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности*. Сб. трудов ВНИИОЭНГ. М. 1977. №9. С. 3–5.
21. Гутман Э.М., Зайнуллин Р.С., Зарипов Р.А. Кинетика механохимического разрушения и долговечность растянутых конструктивных элементов при упругопластических деформациях. *Физико-химическая механика материалов*. 1984. №2. С. 14–17.
22. Гутман Э.М., Зайнуллин Р.С. Методика расчета запаса на коррозионный износ тонкостенных сосудов и трубопроводов. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1983. №11. С. 38–40.
23. Овчинников И.Г. *Механика пластинок и оболочек, подвергающихся коррозионному износу*. СПТИ. Саратов, 1991. 115 с. Деп. в ВИНТИ АН СССР. 30.07.91. № 3251 В91Деп.
24. Карпунин В.Г. К расчету гибких, физически нелинейных пластин с учетом сплошной коррозии. *Исследования по теории оболочек*. Сб. трудов. Казань. 1976. Вып. 7. С. 47–49.
25. Карпунин В.Г., Клещев С.И., Корнишин М.С. К расчету пластин и оболочек с учетом общей коррозии. *Труды X Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин*. Тбилиси: Мецниереба, 1975. Т. 1. С. 166–174.
26. Овчинников И.Г., Елисеев Л.Л. Применение логистического уравнения для описания процесса коррозионного разрушения. *Физико-химическая механика материалов*. 1981. №6. С. 30–35.
27. Овчинников И.Г. Об одной модели коррозионного разрушения. *Механика деформируемых сред*. Межвуз. научн. сб. СПТИ. Саратов. 1979. Вып. 6. С. 183–188.
28. Пронина Ю.Г. Равномерная механохимическая коррозия полой сферы из материала Прандтля под действием постоянного давления. *Вестник СПбГУ. Сер. 1*. 2009. Вып. 1. С. 113–122.
29. Пронина Ю.Г. Расчет долговечности упругой трубы под действием продольной силы, давления и осесимметричного нагрева в условиях равномерной коррозии. *Проблемы прочности и пластичности*. 2009. Вып. 71. С. 129–135.
30. Седова О.С., Пронина Ю.Г. Модель коррозионного износа тонкостенной сферы с учетом различных температур окружающей среды. *XXII Петербургские чтения по проблемам прочности. К 110-летию со дня рождения академика С.Н. Журкова и 85-летию со дня рождения профессора В.А. Лихачева*. Сб. материалов. 12–14 апр. 2016 г. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2016. С. 366–368.
31. Pronina Y. Analytical solution for the general mechanochemical corrosion of an ideal elastic-plastic thick-walled tube under pressure. *International Journal of Solids and Structures*. 2013. Vol. 50. Iss. 22–23. P. 3626–3633.

32. Гончарова Г.А., Овчинников И.Г. Ползучесть прямоугольных пластинок в условиях коррозионного износа. *Тр. XIV Всесоюз. конф. по теории пластин и оболочек*. Кутаиси, 1987. Т. 1. С. 374–379.
33. Овчинников И.Г. Длительная прочность нелинейно-упругой цилиндрической оболочки, взаимодействующей с коррозионной средой. *Тр. XIII Всесоюз. конф. по теории пластин и оболочек*. Таллин: ТПИ, 1983. Ч. IV. С. 48–53.
34. Овчинников И.Г. Учет коррозионного разрушения при оценке длительной прочности пластин и оболочек. СПТИ. Саратов, 1983. 22 с. Деп. в ВИНТИ АН СССР. 25.04.83. №2186-83Деп.
35. Овчинников И.Г., Гончарова Г.А. Коррозионно-механическое поведение изгибаемой прямоугольной пластинки. *Физико-химическая механика материалов*. 1987. №3. С. 121–122.
36. Овчинников И.Г., Гончарова Г.А. Накопление повреждений в прямоугольной пластинке, подвергающейся высокотемпературному окислению. Ч. 1. Вывод основных соотношений, описывающих ползучесть и длительную прочность пластинки, подвергающейся окислению. СПТИ. Саратов, 1984. 29 с. Деп. в ВИНТИ АН СССР. 25.03.85. №2097-85Деп.
37. Овчинников И.Г., Гончарова Г.А. Накопление повреждений в прямоугольной пластинке, подвергающейся высокотемпературному окислению. Ч. 2. Исследование влияния различных факторов на кинетику накопления повреждений в прямоугольной пластинке. СПТИ. Саратов, 1984. 30 с. Деп. в ВИНТИ АН СССР. 18.07.85. №5231-85Деп.
38. Овчинников И.Г., Гончарова Г.А. Накопление повреждений в прямоугольной пластинке, подвергающейся высокотемпературному окислению. Ч. 3. Исследование влияния вида нагрузки и закрепления на кинетику накопления повреждений и коррозионный износ прямоугольной пластинки. СПТИ. Саратов, 1986. 18 с. Деп. в ВИНТИ АН СССР. 22.01.86. №451-В86Деп.
39. Овчинников И.Г., Гарбуз Е.В. Термонапряженное состояние толстостенной цилиндрической оболочки, подвергающейся коррозионному износу. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1987. №3. С. 17–20.
40. Овчинников И.Г., Сабитов Х.А. Расчет напряженного состояния и долговечности цилиндрической оболочки при наличии коррозионного износа. *Статика и динамика сложных строительных конструкций*. Сб. трудов. Л.: ЛИСИ, 1984. С. 89–95.
41. Локощенко А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов: М.: МГИУ, 2007. 264 с.
42. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. 504 с.
43. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах. М.: Изд-во МГУ, 2000. 178 с.
44. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 752 с.
45. Локощенко А.М. Влияние масштабного фактора на длительную прочность. *Проблемы прочности*. 1995. №3. С. 13–18.
46. Локощенко А.М. Зависимость характеристик длительной прочности от параметров поперечного сечения образцов. *Известия вузов. Машиностроение*. 1995. №4–6. С. 5–11.
47. Локощенко А.М. Зависимость характеристик ползучести и длительной прочности от размеров поперечного сечения образцов. *Физико-химическая механика материалов*. 1997. Т. 33. №1. С. 70–74.
48. Тихонов А.Н., Самарский А.А. *Уравнения математической физики*. М.: Наука, 2004. 800 с.
49. Lokoshchenko A.M. *Creep and Creep Rupture of Metals*. Boca Raton–London–New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2018. 546 p.
50. Локощенко А.М., Назаров В. В. Моделирование влияния диффузии окружающей среды на длительную прочность толстостенной трубы при одноосном растяжении. *ПМТФ*. 2007. №4. С. 88–93.
51. Локощенко А.М., Фомин Л.В. Влияние формы поперечного сечения растягиваемых стержней на длительную прочность при наличии агрессивной окружающей среды. *ПМТФ*. 2016. Т. 57. №5. С. 35–44.

52. Локощенко А.М., Фомин Л.В. Длительное разрушение пластин при изгибе с учетом влияния агрессивной среды. *Успехи современного естествознания. Физ.-мат. науки*. М.: Академия естествознания, 2015. №1. Ч. 4. С. 639–640.
53. Локощенко А.М., Фомин Л.В. Длительное разрушение пластин при переменных изгибающих моментах в присутствии агрессивной среды. *Прикладная математика и механика*. 2016. №2. С. 276–284.
54. Локощенко А.М., Фомин Л.В. Моделирование длительной прочности растягиваемых стержней в агрессивной среде с учетом переменного коэффициента диффузии. *Механика композитных материалов*. 2014. №6. С. 1033–1042.
55. Локощенко А.М., Кулагин Д.А. Влияние запирающего эффекта диффузионного процесса на длительную прочность. *Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика*. 2014. №5. С. 65–68.
56. Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В. Ползучесть балок при изгибе в агрессивных средах. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. №4. С. 70–75.
57. Фомин Л.В. Описание длительной прочности растягиваемых стержней прямоугольного и круглого поперечных сечений в высокотемпературной воздушной среде. *Вестник СамГТУ. Сер. физ.-мат. науки*. 2013. №3(32). С. 87–97.
58. Фомин Л.В. Установившаяся ползучесть составного стержня при растяжении в условиях агрессивной среды. *Механика композитных материалов*. 2016. Т. 52. № 6. С. 1055–1068.
59. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. Delayed fracture of plates under creep condition in unsteady complex stress state in the presence of aggressive medium. *Applied Mathematical Modelling*. 2018. Vol. 60. P. 478–489.
60. Шестериков С.А., Юмашева М.А. Конкретизация уравнения состояния в теории ползучести. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*. 1984. №1. С. 86–92.
61. Локощенко А.М. Методика моделирования ползучести и длительной прочности металлов в агрессивных средах. *Современные достижения в науке и образовании: Сб. трудов IV Междун. научн. конф.* 11–18 сент. 2010 г. Будва, Черногория: Хмельн. нац. ун-т, 2010. С. 140–142.
62. Локощенко А.М., Ильин А.А., Мамонов А.М., Назаров В.В. Анализ ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 с предварительно внедренным водородом. *Физико-химическая механика материалов*. 2008. №5. С. 98–104.
63. Локощенко А.М., Ильин А.А., Мамонов А.М., Назаров В. В. Экспериментально-теоретическое исследование влияния водорода на ползучесть и длительную прочность титанового сплава ВТ6. *Известия РАН. Металлы*. 2008. №2. С. 60–66.
64. Локощенко А.М., Назаров В. В. Экспериментально-теоретическое исследование ползучести и длительной прочности титанового сплава ВТ6 при 600 °С. *Известия вузов. Машиностроение*. 2008. №7. С. 3–11.
65. Астафьев В.И., Ширяева Л.К. Накопление поврежденности в металлах в условиях коррозионного растрескивания под напряжением. *Известия РАН. Механика твердого тела*. 1997. №3. С. 115–124.
66. Астафьев В.И., Ширяева Л.К. *Накопление поврежденности и коррозионное растрескивание металлов под напряжением*. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 1998. 123 с.
67. Кулагин Д.А., Локощенко А.М. Анализ влияния окружающей среды на длительную прочность с помощью вероятностного подхода. *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2001. №1. С. 124–133.
68. Кулагин Д.А., Локощенко А.М. Моделирование влияния агрессивной окружающей среды на ползучесть и длительную прочность металлов при сложном напряженном состоянии. *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2004. №1. С. 188–199.
69. Kulagin D.A., Lokoshchenko A.M. Analysis of the influence of aggressive environment on creep and creep rupture of rod under pure bending. *Archive of Applied Mechanics*. 2005. Vol. 74. Iss. 8. P. 518–525.
70. Lokoshchenko A., Kulagin D. Mutual influence of diffusion and creep rupture processes. *6th International Symposium on Creep and Coupled Processes*. 23–25 Sept. 1998. Bialystok, Poland. 1998. P. 323–332.

71. Локощенко А.М. Описание длительной прочности металлов с помощью вероятностной модели. *Вестник двигателестроения*. 2008. №3. С. 102–105.
72. Овчинников И.Г. Об одной схеме учета воздействия коррозионной среды при расчете элементов конструкций. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1984. №1. С. 34–38.
73. Овчинников И.Г. Анализ применимости одной модели коррозионного разрушения к расчету долговечности элементов конструкций. *Работоспособность материалов и элементов конструкций при воздействии агрессивных сред*. Межвуз. научн. сб. СПТИ. Саратов. 1986. С. 8–10.
74. Петров В.В., Овчинников И.Г., Иноземцев В.К. *Деформирование элементов конструкций из нелинейного разномодульного неоднородного материала*. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. 159 с.
75. Овчинников И.Г., Петров В.В. Математическое моделирование процесса взаимодействия элементов конструкций с агрессивными средами. В сб.: *Деформирование материалов и элементов конструкций в агрессивных средах*. СПТИ. Саратов. 1983. С. 3–11.
76. Овчинников И.Г. Прочность и долговечность элементов конструкций в агрессивных средах. *Расчет элементов конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред*. Межвуз. научн. сб. СПТИ. Саратов. 1985. С. 7–9.
77. Овчинников И.Г., Колесников С.В. *Уравнение состояния для материала, подвергающегося водородной коррозии при высоких температурах и давлениях, и его анализ*. Саратов: Изд-во СПТИ, 1991. 28 с.
78. Овчинников И.Г., Саликов А.Ю., Колесников С.В. Напряженное состояние и долговечность круглой пластинки, подвергающейся водородной коррозии. *Труды XVI Междунар. конф. по теории оболочек и пластин*. 21–23 сент. 1993 г. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 1994. Т. 3. С. 163–168.
79. Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.
80. Овчинников И.Г., Рассада А.Б. Модель взаимодействия нагруженных элементов конструкций с водородосодержащей средой и ее приложения. *Прикладные проблемы прочности и устойчивости деформируемых систем в агрессивных средах*. Саратов: Изд-во СПТИ, 1989. С. 12–16.
81. Вильчевская Е.Н., Фрейдин А.Б., Морозов Н.Ф. Кинетика фронта химической реакции в центрально-симметричных задачах механохимии. *Доклады РАН*. 2015. Т. 461. №5. С. 525–529.
82. Королев И.К., Алешенко С.П., Фрейдин А.Б., Вильчевская Е.Н. Численное моделирование развития фронта химических реакций в окрестности концентраторов напряжений в твердых телах. *Сб. трудов XI Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*. 20–24 авг. 2015 г. Казань. С. 1988–1990.
83. Фрейдин А.Б. О тензоре химического сродства при химических реакциях в деформируемых материалах. *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2015. №3. С. 35–69.
84. Вильчевская Е.Н., Королев И.К., Фрейдин А.Б. О фазовых превращениях в области неоднородности материала. Ч. 2. Взаимодействие трещины с включением, претерпевающим фазовое превращение. *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2011. №5. С. 32–42.
85. Фрейдин А.Б., Демидов И.В. Химическое сродство и кинетика фронта химической реакции в деформируемом материале: одномерный случай. *Современные проблемы механики сплошной среды: Тр. XVIII Международ. конф.* 14–17 окт. 2014 г. Ростов-на Дону. Т. 1. С. 156–160.
86. Collected works of J.D. Eshelby. *The Mechanics of Defects and Inhomogeneities (Solid Mechanics and its Applications)*. Eds. K. Markenscoff, A. Gupta. Berlin: Springer, 2006. 930 p.
87. Eshelby J.D. Energy relations and the energy-momentum tensor in continuum mechanics. *Inelastic Behavior of Solids*. Eds. M. Kanninen et al. New York: McGraw-Hill, 1970. P. 77–115.
88. Eshelby J.D. The elastic energy-momentum tensor. *Journal of Elasticity*. 1975. Vol. 5. No 4. P. 321–335.
89. Павлина В.С., Федирко В.Н., Магычак Я.С., Тарлупа Т.С. Анализ кинетики сублимации и легирующих элементов сплавов с учетом химических превращений. *Физико-химическая механика материалов*. 1959. Т. 21. №6. С. 60–64.

90. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А., Панов В.А., Тряев П.В. Моделирование на основе соотношений механики поврежденной среды процессов растрескивания под напряжением нержавеющей стали в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 2. С. 77–87.
91. Чувильдеев В.Н., Копылов В.И., Бахметьев А.М., Сандлер Н.Г., Нохрин А.В., Тряев П.В., Лопатин Ю.Г., Козлова Н.А., Пискунов А.В., Мелехин Н.В. Эффект одновременного повышения прочности и коррозионной стойкости микрокристаллических титановых сплавов. *Доклады РАН*. 2012. Т. 442. №3. С. 329–331.
92. Ржаницын А.Р. *Теория расчета строительных конструкций на надежность*. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
93. Прыткин И.А. О влиянии характера коррозионного износа и толщины пластины на распределение напряжений в ней. *Труды управления кадров учебных заведений Министерства рыбного хозяйства СССР*. М., 1972. Вып. 41. С. 64–70.
94. Прыткин И.А. О концентрации напряжений в координированной пластине корпуса. *Труды Калининградского института рыбной промышленности и хозяйства*. Калининград, 1970. Вып. 33. С. 36–38.
95. Флак В.Я. Коррозия стальных конструкций предприятий черной металлургии. *Промышленное строительство*. 1966. №4. С. 21–22.
96. Тимашев С.А. Две новые задачи надежности гладких и подкрепленных оболочек. *Проблемы надежности в строительном проектировании*. Сб. трудов. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР. 1972. С. 38–49.
97. Тимашев С.А. *Надежность больших механических систем*. М.: Наука, 1982. 184 с.
98. Магомедов Р.М. Расчет надежности элементов строительных конструкций, находящихся под воздействием коррозии. *Исследования и расчет строительных конструкций*. Сб. трудов. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М. 1983. С. 53–58.
99. Райзер В.Д. Вопросы надежности строительных конструкций при износе. *Исследования по строительной механике*. Сб. трудов. М.: Наука, 1985. С. 61–66.
100. Райзер В.Д., Аширов А.И. Устойчивость стержней случайно-переменного сечения. *Исследование по прочности и надежности строительных конструкций*. Тр. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М. 1988. С. 78–87.
101. Райзер В.Д., Магомедов Р.М. Надежность и долговечность пространственных конструкций при износе. *Применение оболочек в инженерных сооружениях: Тр. Международного конгресса по теории и экспериментальным исследованиям пространственных конструкций*. М., 1985. Т. 1. С. 653–666.
102. Маннапов Р.Г. Оценка надежности аппаратов в условиях поверхностного разрушения технологическими средами. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1987. №5. С. 11–12.
103. Маннапов Р.Г. Методы оценки надежности оборудования, подвергающегося сплошной коррозии. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1989. №5. С. 27–29.
104. Маннапов Р.Г. Прогнозирование надежности оборудования путем статистического анализа эксплуатационных параметров. *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1990. №5. С. 1–3.
105. Арутюнян Р.А. Вероятностная модель разрушения вследствие питтинговой коррозии. *Проблемы прочности*. 1989. №12. С. 106–108.
106. Овчинников И.Г. О задачах оптимального проектирования конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред. *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1988. №9. С. 17–20.
107. Магомедов Р.М. Надежностная оптимизация цилиндрической оболочки, подверженной коррозионному износу. *Работоспособность материалов и элементов конструкций при воздействии агрессивных сред*. Межвуз. научн. сб. СПТИ. Саратов. 1986. С. 58–59.
108. Siemes A.J.M., Vrouwenvelder A.C.W.M., Van Den Benkel A. Durability of buildings: a reliability analysis. *Heron*. 1985. Vol. 11. No 3. P. 2–47.
109. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Богина М.Ю. Моделирование деформирования и разрушения материалов в условиях радиационного облучения с учетом влияния вида напряженного состояния. Сообщение 1. Об учете влияния радиационного облучения при

построении моделей деформирования в радиационных условиях с применением теории структурных параметров. *Интернет-журнал Науковедение*. 2013. №2. <http://publ.naukovedenie.ru>.

110. Овчинников И.Г., Богина М.Ю., Матора А.В. Влияние радиационных сред на механические характеристики материалов и поведение конструкций (обзор). *Интернет-журнал Науковедение*. 2012. №4. <http://publ.naukovedenie.ru>.

111. Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Богина М.Ю., Матора А.В. Модели и методы, используемые при расчете и моделировании поведения конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред. *Интернет-журнал Науковедение*. 2013. №2. <http://publ.naukovedenie.ru>.

112. Ленский В.С. Влияние радиоактивных облучений на механические свойства твердых тел. *Инженерный сборник*. 1960. Т. 28. С. 97–133.

113. Ильющин А.А., Огибалов П.М. О прочности оболочек толстостенного цилиндра и полого шара, подвергнутых облучению. *Инженерный сборник*. 1960. Т. 28. С. 134–144.

114. Куликов И.С., Тверковкин Б.Е. *Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов*. Под ред. В.Б. Нестеренко. Минск: Наука и техника, 1984. 104 с.

115. Куликов И.С., Тверковкин Б.Е. Прочностной расчет твэла газоохлаждаемого быстрого реактора при жестком контакте топлива и оболочки. *Весці ЛІ БССР. Серыя фізіка-энергетычных навук*. 1979. №2. С. 60–63.

116. Писаренко Г.С., Киселевский В.Н. *Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках*. Киев: Наукова думка, 1979. 281 с.

117. Киселевский В.Н. Об уравнении состояния структурноустойчивой нержавеющей стали в радиационном поле высокой интенсивности. *Проблемы прочности*. 1974. №7. С. 30–33.

118. Писаренко Г.С. Влияние реакторных излучений на сопротивление ползучести и длительную прочность аустенитной нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ. *Проблемы прочности*. 1974. №4. С. 3–8.

119. Марголин Б.З., Гуленко А.Г., Курсевич И.П., Бучатский А.А. Прогнозирование длительной прочности аустенитных материалов при нейтронном облучении. *Вопросы материаловедения*. 2005. №2. С. 163–186.

120. Марголин Б.З., Бучатский А.А., Гуленко А.Г. и др. Новый метод прогнозирования сопротивления циклическому нагружению при вязкоупругопластическом деформировании и нейтронном облучении. *Проблемы прочности*. 2008. №6. С. 5–24.

121. Митенков Ф.М., Большухин М.А., Козин А.В., Коротких Ю.Г., Панов В.А., Пахомов В.А., Пичков С.Н. Технология эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем ЯЭУ. *Проблемы прочности и пластичности*. 2012. Вып. 74. С. 68–77.

122. Капустин С.А., Горохов В.А., Чурилов Ю.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Зверев Д.Л., Гуленко А.Г., Сорокин А.А. Верификация методических и программных средств численного исследования напряженно-деформированного состояния конструкций из стали типа Х16Н11М3 при квазистатических терморadiационных нагружениях. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 36–45.

123. Хажинский Г.М. *Поведение металла ядерных реакторов*. М.: Спутник+, 2018. 233 с.

124. Антикайн П.А. *Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов*. М.: Энергия, 1980. 424 с.

125. Беруштитс Г.К., Кларк Г.Б. *Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях*. М.: Наука, 1971. 160 с.

126. Коэн П. *Технология воды энергетических реакторов*. М.: Атомиздат, 1973. 328 с.

127. Мельников Г.П. *Долговечность элементов конструкций в условиях высоких температур при стендовых испытаниях*. М.: Атомиздат, 1979. 80 с.

128. Никитин В.И. *Расчет жаростойкости металлов*. М.: Металлургия, 1976. 208 с.

129. Овчинников И.Г., Раткин В.В., Землянский А.А. *Моделирование поведения железобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридосодержащих сред*. Саратов: СГТУ, 2000. 232 с.

130. Овчинников И.Г., Хвалько Т.А. *Работоспособность конструкций в условиях высокотемпературной водородной коррозии*. Саратов: СГТУ, 2003. 176 с.

131. Павлов П.А., Кадырбеков Б.А., Колесников В.А. *Прочность сталей в коррозионных средах*. Алма-Ата: Наука, 1987. 272 с.
132. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. *Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой*. Саратов: СГУ, 1987. 288 с.
133. Гутман Э.М., Зайнуллин Р.С., Шаталов А.Т. и др. *Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа*. М.: Недра, 1984. 76 с.
134. Романив О.Н., Никифорчин Г.Н. *Механика коррозионного разрушения конструкционных материалов*. М.: Metallurgia, 1986. 294 с.
135. Цикерман Л.Я. *Диагностика коррозии трубопроводов с применением ЭВМ*. М.: Недра, 1977. 319 с.
136. Цикерман Л.Я. *Долгосрочный прогноз опасности грунтовой коррозии металлов*. М.: Недра, 1966. 175 с.
137. Локощенко А.М. Методы моделирования влияния окружающей среды на ползучесть и длительную прочность металлов. *Успехи механики*. 2002. Т. 1. №4. С. 90–120.
138. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов в агрессивных средах (обзор). *Физико-химическая механика материалов*. 2001. №4. С. 27–41.
139. Карзов Г.П., Марков В.Г., Яковлев В.А. Совместимость конструкционных материалов с теплоносителем на основе свинца и его сплавов. *Прогрессивные материалы и технологии*. 1999. №3. С. 51–56.
140. Кудрявцев А.С., Каштанов А.Д., Марков В.Г., Лаврухин В.С. Ползучесть хромистой мартенситной стали в теплоносителе на основе свинца. *Вопросы материаловедения*. 2007. №1. С. 78–82.
141. Кудрявцев А.С., Марков В.Г., Лаврухин В.С. Длительная прочность стали в жидкометаллическом теплоносителе на основе свинца. *Вопросы материаловедения*. 2006. №4. С. 89–94.
142. Огородов Л.И., Белов А.С. Экспериментальная проверка эффективности кинетических уравнений повреждений силового типа при описании длительного разрушения жаропрочного сплава в агрессивной среде в условиях нестационарного нагружения. *Проблемы прочности*. 1995. № 3. С. 19–27.
143. Кязимова Р.А., Багиров Э.Т. О времени коррозионного разрушения металлов с учетом влияния механического напряжения и температуры. *Наука и конструирование*. 2010. №4. С. 64–66.

References

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii № 899 ot 7 iyulya 2011 g. "Ob utverzhdenii prioritnykh napravleniy razvitiya nauki, tekhnologii i tekhniki v Rossiyskoy Federatsii i perechnya kriticheskikh tekhnologii Rossiyskoy Federatsii" [The Decree of the President of the Russian Federation No 899 of July 7, 2011. "About the Approval of the Priority Directions of Development of Science, Technologies and Equipment in the Russian Federation and the List of Critical Technologies of the Russian Federation"] (In Russian).
2. Frumkin A.N., Bagotskii V.C., Iofa Z., Rabanov B.N. *Kinetika elektrodnykh protsessov [Kinetics of Electrode Processes]*. Moscow. MSU Publ. 1952. 320 p. (In Russian).
3. Evans Yu.R. *Korroziya i okislenie metallov. Teoreticheskie osnovy i ikh prakticheskoe primeneniye [Corrosion and Oxidation of Metals. Theoretical Foundations and Their Practical Application]*. Moscow. Mashgiz Publ. 1962. 256 p. (In Russian).
4. Gutman E.M. *Mekhanokhimiya metallov i zashchita ot korrozii [Mechanochemistry of Metals and Corrosion Protection]*. Moscow. Metallurgia Publ. 1981. 281 p. (In Russian).
5. Birks N., Meier G.H., Pettit F.S. *Introduction to the High Temperature Oxidation of Metals*. Cambridge. Cambridge University Press. 1983. 336 p.
6. West A.R. *Solid State Chemistry and its Applications. Part 1*. Willey Press. 1984. 368 p.
7. West A.R. *Solid State Chemistry and its Applications. Part 2*. Willey Press. 1984. 352 c.
8. Uhlig H.H., Revie R.W. *Corrosion and Corrosion Control. An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. New York. John Wiley&Sons. 1985. 513 p.
9. Semenova I.V., Florianovich G.M., Khoroshilov A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii [Corrosion and Corrosion Protection]*. Moscow. Fizmatgiz Publ. 2002. 336 p. (In Russian).

10. *Korroziya [Corrosion]*. Ed. L.L. Shraer. Moscow. Metallurgia Publ. 1981. 632 p. (In Russian).
11. *Fizicheskaya entsiklopediya*. V 5 t. [*Physical Encyclopedia*. In 5 vols]. Chief ed. A.M. Prokhorov. Moscow. Sovetskaia entsiklopedia Publ. 1988–1998 (In Russian).
12. *Khimicheskaya entsiklopediya*. V 5 t. [*Chemical Encyclopedia*. In 5 vols]. Eds. I.L. Knu-niants, N.S. Zefirov. Moscow. Sovetskaia entsiklopedia Publ. 1988–1998 (In Russian).
13. Ovchinnikov I.G., Naumova G.A. *Raschety na prochnost slozhnykh sterzhnevyykh i truboprovodnykh konstruksiy s uchetom korroziionnykh povrezhdeniy* [*Calculations on the Strength of Complex Rod and Pipeline Structures Taking into Account Corrosion Damage*]. Saratov. SSTU Publ. 2000. 227 p. (In Russian).
14. Kikin A.I. Osobennosti proektirovaniya i rascheta stalnykh konstruksiy, podvergayushchikhsya vozdeystviyu agressivnoy sredy [Features of design and calculation of steel structures exposed to aggressive environments]. *Metallicheskie materialy i konstruksii* [*Metal Materials and Structures*]. Collection of papers. Moscow. MECI Publ. 1962. No 43. P. 8–16 (In Russian).
15. Dolinskii V.M. Raschet nagruzhennykh trub, podverzhennykh korrozii [Calculation of loaded pipes exposed to corrosion]. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [*Chemical and Petroleum Engineering*]. 1967. No 2. P. 9–10 (In Russian).
16. Dolinskii V.M. Raschet elementov konstruksiy, podverzhennykh ravnomernoy korrozii [Calculation of structural elements subject to uniform corrosion]. *Issledovanie po teorii obolochek* [*A Study on the Theory of Shells*]. Collection of papers KISI. Kazan. 1976. Iss. 7. P. 37–42 (In Russian).
17. Ovchinnikov I.G. O metodologii postroeniya modeley konstruksiy, vzaimodeystvuyushchikh s agressivnymi sredami [About the methodology of constructing models of structures interacting with aggressive media]. *Dolgovechnost materialov i elementov konstruksiy v agressivnykh i vysokotemperaturnykh sredakh* [*Durability of Materials and Structural Elements in Aggressive and High-temperature Environments*]. Interuniversity scientific collection. Saratov. SPI Publ. 1988. P. 17–21 (In Russian).
18. Ovchinnikov I.G., Dvorkin M.S., Sabitov H.A. Bank matematicheskikh modeley korroziionnogo iznosa, primenyaemykh dlya prognozirovaniya povedeniya metallokonstruksiy [Bank of mathematical models of corrosion wear, used to predict the behavior of metal structures]. *Problemy prochnosti materialov i konstruksiy, vzaimodeystvuyushchikh s agressivnymi sredami* [*Problems of Strength of Materials and Structures Interacting with Aggressive Media*]. Interuniversity scientific collection. Saratov. SSTU Publ. 1993. P. 141–150 (In Russian).
19. Ovchinnikov I.G., Kudaibergenov N.B., Dvorkin M.S. Modelirovanie kinetiki korrozii metallokonstruksiy s ispolzovaniem banka matematicheskikh modeley korrozii [Modeling of kinetics of corrosion of metal structures using the bank of mathematical models of corrosion]. *Problemy povysheniya nadezhnosti i dolgovechnosti konstruksiy zdaniy i sooruzheniy* [*Problems of Increasing the Reliability and Durability of Structures of Buildings and Structures*]. Collection of scientific papers. KazChTI Publ. Shimkent. 1993. P. 9–25 (In Russian).
20. Gutman E.M., Zainullin R.S., Zaripov R.A. Dolgovechnost sosudov vysokogo davleniya v usloviyakh mekhanokhimicheskoy korrozii [Durability of pressure vessels in mechanochemical corrosion]. *Korroziya i zashchita v neftegazovoy promyshlennosti* [*Corrosion and Protection in the Oil and Gas Industry*]. Collection of papers of VNIIOENG. Moscow. 1977. No 9. P. 3–5 (In Russian).
21. Gutman E.M., Zainullin R.S., Zaripov R.A. Kinetika mekhanokhimicheskogo razrusheniya i dolgovechnost rastyanutykh konstruktivnykh elementov pri uprugoplasticheskikh deformatsiyakh [Kinetics of mechanochemical destruction and durability of stretched constructive elements in elastoplastic deformations]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [*Materials Science*]. 1984. No 2. P. 14–17 (In Russian).
22. Gutman E.M., Zainullin R.S. Metodika rascheta zapasa na korroziionnyy iznos tonkostennykh sosudov i truboprovodov [Method of calculating the stock for corrosive wear of thin-walled vessels and pipelines]. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [*Chemical and Petroleum Engineering*]. 1983. No 11. P. 38–40 (In Russian).
23. Ovchinnikov I.G. *Mekhanika plastinok i obolochek, podvergayushchikhsya korroziionnomu iznosu* [*Method of Calculating the Stock for Corrosive Wear of Thin-walled Vessels and Pipelines*].

SPTI. Saratov. 1991. 115 p. Deposited at the VINITI of the USSR Academy of Sciences. 30.07.91. No 3251 B91Dep. (In Russian).

24. Karpunin V.G. K raschetu gibkikh, fizicheski nelineynykh plastin s uchetom sploshnoy korrozii [To the calculation of flexible, physically nonlinear plates with allowance for solid corrosion]. *Issledovaniya po teorii obolochek* [Studies on the Theory of Shells]. Collection of papers Kazan. 1976. Iss. 7. P. 47–52 (In Russian).

25. Karpunin V.G., Kleshev S.I., Kornishin M.S. K raschetu plastin i obolochek s uchetom obshchey korrozii [To the calculation of plates and shells taking into account the general corrosion]. *Trudy X Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastin* [Proceedings of the 10th All-Union Conference on the Theory of Shells and Plates]. Tbilisi. Metsniereba Publ. 1975. Vol. 1. P. 166–174 (In Russian).

26. Ovchinnikov I.G., Eliseev L.L. Primenenie logisticheskogo uravneniya dlya opisaniya protsessa korroziionnogo razrusheniya [Application of the logistic equation for describing the process of corrosion failure]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Materials Science]. 1981. No 6. P. 30–35 (In Russian).

27. Ovchinnikov I.G. Ob odnoy modeli korroziionnogo razrusheniya [About one model of corrosion destruction]. *Mekhanika deformiruemyykh sred* [Mechanics of Deformable Media]. Interuniversity scientific collection. Saratov. SSTU Publ. 1979. Iss. 6. P. 183–188 (In Russian).

28. Pronina Yu.G. Ravnomernaya mekhanokhimicheskaya korroziya poloy sfery iz materiala Prandtlya pod deystviem postoyannogo davleniya [Equal mechanochemical corrosion of an ideal elasto-plastic hollow sphere under constant pressure]. *Vestnik SPbGU. Ser. 1* [St. Petersburg University Mechanics Bulletin]. 2009. Iss. 1. P. 113–122 (In Russian).

29. Pronina Yu.G. Raschet dolgovechnosti uprugoy trubyy pod deystviem prodolnoy sily, davleniya i osesimmetrichnogo nagreva v usloviyakh ravnomernoy korrozii [The analysis of the service life of an elastic pipe loaded by a longitudinal force, pressure and axisymmetric heating in the conditions of uniform corrosion]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2009. Iss. 71. P. 129–135 (In Russian).

30. Sedova O.S., Pronina Yu.G. Model korroziionnogo iznosa tonkostennoy sfery s uchetom razlichnykh temperatur okruzhayushchikh sred [Model of corrosion wear of a thin-walled sphere taking into account various temperatures of the surrounding mediums]. *XXII Peterburgskie chteniya po problemam prochnosti* [XII St. Petersburg Readings on the Problems of Strength]. 12–14 Apr. 2016. St. Petersburg. Collected materials. Polytechnic University Publ. 2016. P. 366–368 (In Russian).

31. Pronina Y. Analytical solution for the general mechanochemical corrosion of an ideal elastic-plastic thick-walled tube under pressure. *International Journal of Solids and Structures*. 2013. Vol. 50. Iss. 22–23. P. 3626–3633.

32. Goncharova G.A., Ovchinnikov I.G. Polzuchest pryamougolnykh plastinok v usloviyakh korroziionnogo iznosa [Creep of rectangular plates in conditions of corrosive wear]. *Trudy XIV Vsesoyuz. konf. po teorii plastin i obolochek* [Proceedings of the XIV All-Union Conference on the Theory of Plates and Shells]. Kutaisi. 1987. Vol. 1. P. 374–379 (In Russian).

33. Ovchinnikov I.G. Dlitelnaya prochnost nelineyno-uprugoy tsilindricheskoy obolochki, vzaimodeystvuyushchey s korroziionnoy sredoy [Long-term strength of a nonlinearly elastic cylindrical shell interacting with corrosive medium]. *Trudy XIII Vsesoyuz. konf. po teorii plastin i obolochek* [Proceedings of the XIII All-Union Conference on the Theory of Plates and Shells]. Tallinn. 1983. Iss. IV. P. 48–53 (In Russian).

34. Ovchinnikov I.G. *Uchet korroziionnogo razrusheniya pri otsenke dlitel'noy prochnosti plastin i obolochek* [The Account of Corrosion Damage in the Evaluation of the Long-term Strength of Plates and Shells]. SPTI. Saratov. 1983. 22 p. Deposited at the VINITI of the USSR Academy of Sciences. 25 Apr. 1983. No 2186-83Dep. (In Russian).

35. Ovchinnikov I.G., Goncharova G.A. Korroziionno-mekhanicheskoe povedenie izgibaemoy pryamougolnoy plastinki [Corrosion-mechanical behavior of a bent rectangular plate]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Materials Science]. 1987. No 3. P. 121–122 (In Russian).

36. Ovchinnikov I.G., Goncharova G.A. *Nakoplenie povrezhdeniy v pryamougolnoy plastinke, podvergayushcheysya vysokotemperaturnomu okisleniyu. Ch. 1. Vyvod osnovnykh sootnosheniy, opisyvayushchikh polzuchest i dlitelnyuyu prochnost plastinki, podvergayushcheysya okisleniyu* [Accumulation of Damage in a Rectangular Plate Subjected to High-temperature Oxidation.

Part 1. Derivation of the Main Relationships Describing the Creep and Long-term Strength of a Plate Undergoing Oxidation]. SPTI. Saratov. 1984. 29 p. Deposited at the VINITI of the USSR Academy of Sciences. 25.03.85. No 2097-85Dep. (In Russian).

37. Ovchinnikov I.G., Goncharova G.A. *Nakoplenie povrezhdeniy v pryamougolnoy plastinke, podvergayushcheyasya vysokotemperaturnomu okisleniyu. Ch. 2. Issledovanie vliyaniya razlichnykh faktorov na kinetiku nakopleniya povrezhdeniy v pryamougolnoy plastinke* [Accumulation of Damage in a Rectangular Plate Subjected to High-temperature Oxidation. Part 2. Investigation of the Influence of Various Factors on the Kinetics of Damage Accumulation in a Rectangular Plate]. SPTI. Saratov. 1984. 30 p. Deposited at the VINITI of the USSR Academy of Sciences. 18.07.85. No 5231-85Dep. (In Russian).

38. Ovchinnikov I.G., Goncharova G.A. *Nakoplenie povrezhdeniy v pryamougol'noy plastinke, podvergayushcheyasya vysokotemperaturnomu okisleniyu. Ch. 3. Issledovanie vliyaniya vida nagruzki i zakrepleniya na kinetiku nakopleniya povrezhdeniy i korrozionnyy iznos pryamougolnoy plastinki* [Accumulation of Damage in a Rectangular Plate Subjected to High-temperature Oxidation. Part 3. Investigation of the Influence of the Load Type and Fixing on the Kinetics of Damage Accumulation and Corrosion Wear of a Rectangular Plate]. SPTI. Saratov. 1986. 18 p. Deposited at the VINITI of the USSR Academy of Sciences. 22.01.86. No 451-B86Dep (In Russian).

39. Ovchinnikov I.G., Garbuz E.V. *Termonapryazhennoe sostoyanie tolstostennoy tsilindrichesko-y obolochki, podvergayushcheyasya korrozionnomu iznosu* [Thermal stress of a thick-walled cylindrical shell subjected to corrosive wear]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1987. No 3. P. 17–20 (In Russian).

40. Ovchinnikov I.G., Sabitov K.A. *Raschet napryazhennogo sostoyaniya i dolgovechnosti tsilindrichesko-y obolochki pri nalichii korrozionnogo iznosa* [Calculation of the stress state and durability of a cylindrical shell in the presence of corrosive wear]. *Statika i dinamika slozhnykh stroitelnykh konstruksiy* [Statics and Dynamics of Complex Building Structures]. Collected papers. Leningrad. LISI Publ. 1984. P. 89–95 (In Russian).

41. Lokoshchenko A.M. *Modelirovanie protsessa polzuchesti i dlitelnoy prochnosti metallov* [Modeling of Creep and Long-term Strength of Metals]. Moscow. MSIU Publ. 2007. 264 p. (In Russian).

42. Lokoshchenko A.M. *Polzuchest i dlitel'naya prochnost metallov* [Creep and Long-lasting Strength of Metals]. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 504 p. (In Russian).

43. Lokoshchenko A.M. *Polzuchest i dlitel'naya prochnost metallov v agressivnykh sredakh* [Creep and Long-term Strength of Metals in Corrosive Environments]. Moscow. MSU Publ. 2000. 178 p. (In Russian).

44. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest elementov konstruksiy* [Creep of Structural Elements]. Moscow. Nauka Publ. 1966. 752 p. (In Russian).

45. Lokoshchenko A.M. Effect of the scale factor on long-term strength. *Strength of Materials*. 1995. No 3. P. 112–116.

46. Lokoshchenko A.M. Zavisimost kharakteristik dlitelnoy prochnosti ot parametrov poperechnogo secheniya obratsov [Dependences of the characteristics of long-term strength on the cross-sectional parameters of specimens]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [Proceedings of High School. Mechanical Engineering]. 1995. No 4–6. P. 5–11 (In Russian).

47. Lokoshchenko A.M. Zavisimost kharakteristik polzuchesti i dlitelnoy prochnosti ot razmerov poperechnogo secheniya obratsov [Dependence of creep characteristics and long-term strength on cross-sectional dimensions of samples]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Materials Science]. 1997. Vol. 33. No 1. P. 70–74 (In Russian).

48. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow. Nauka Publ. 2004. 800 p. (In Russian).

49. Lokoshchenko A.M. *Creep and Creep Rupture of Metals*. Boca Raton. London. New York. CRC Press Taylor & Francis Group. 2018. 546 p.

50. Lokoshchenko A.M., Nazarov V.V. Modeling the effect of diffusion of the ambient medium on the long-term strength of a hollow cylinder under uniaxial tension. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2007. Vol. 48. No 4. P. 542–546.

51. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. Influence of the cross-sectional shape of tensile bars on

their creep rupture strength in a corrosive medium. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57. No 5. P. 792–800.

52. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. Dlitelnoe razrushenie plastin pri izgibe s uchetom vliyaniya agressivnoy sredy [Creep rupture of the bending plates with account the influence of aggressive media]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. Fiz.-mat. nauki* [Advances in Current Natural Sciences. Series of Physical and Mathematical Sciences]. 2015. No 1. Pt. 4. P. 639–640 (In Russian).

53. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. Creep fracture of plates with variable bending moments in the presence of an aggressive medium. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2016. Vol. 80. No 2. P. 198–204.

54. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. Modeling the creep rupture of tensile rods in an aggressive medium with account of a variable diffusion coefficient. *Mechanics of Composite Materials*. 2014. Vol. 50. No 6. P. 739–746.

55. Lokoshchenko A.M., Kulagin D.A. Diffusion locking effect on long-term Strength. *Moscow University Mechanics Bulletin*. 2014. Vol. 69. No 5. P. 123–125.

56. Lokoshchenko A.M., Agakhi K.A., Fomin L.V. Bending creep of beams in aggressive media. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2013. Vol. 42. No 4. P. 319–324.

57. Fomin L.V. Opisaniye dlitel'noy prochnosti rastyagivaemykh sterzhney pryamougolnogo i kruglogo poperechnykh secheniy v vysokotemperaturnoy vozdushnoy srede [Description of creep rupture strength of tensile rod with rectangular and circular cross-section at high temperature air media]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series of Physical and Mathematical Sciences]. 2013. No 3(32). P. 87–97 (In Russian).

58. Fomin L.V. Steady-state creep of a composite rod in tension in the presence of an aggressive environment. *Mechanics of Composite Materials*. 2016. Vol. 52. No 6. P. 741–750.

59. Lokoshchenko A.M., Fomin L.V. Delayed fracture of plates under creep condition in unsteady complex stress state in the presence of aggressive medium. *Applied Mathematical Modelling*. 2018. Vol. 60. P. 478–489.

60. Shesterikov S.A., Yumasheva M.A. Konkretizatsiya uravneniya sostoyaniya v teorii polzuchesti [Specification of the equation of state in the theory of creep]. *Izvestiya AN SSSR, Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids]. 1984. No 1. P. 86–92 (In Russian).

61. Lokoshchenko A.M. Metodika modelirovaniya polzuchesti i dlitelnoy prochnosti metallov v agressivnykh sredakh [Methods of modeling creep and long-term strength of metals in aggressive media]. *Sovremennye dostizheniya v nauke i obrazovanii. Sbornik trudov IV Mezhdunarod. nauchn. konf.* [Modern Achievements in Science and Education. Collection of Papers IV International Scientific Conference]. 2010. P. 140–142 (In Russian).

62. Lokoshchenko A.M., Il'in A.A., Mamonov A.M., Nazarov V.V. Analysis of the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy with preliminarily injected hydrogen. *Materials Science*. 2008. Vol. 44. No 5. P. 700–704.

63. Lokoshchenko A.M., Nazarov V.V., Il'in A.A., Mamonov A.M. Experimental and theoretical study of the effect of hydrogen on the creep and long-term strength of VT6 titanium alloy. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2008. No 2. P. 142–147.

64. Lokoshchenko A.M., Nazarov V.V. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie polzuchesti i dlitelnoy prochnosti titanovogo splava VT6 pri 600 °C [Experimental and theoretical study of creep and long-term strength of titanium alloy VT6 at 600 °C]. *Izvestiya vuzov. Mashino-stroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2008. No 7. P. 3–11 (In Russian).

65. Astafiev V.I., Shiriaeva L.K. Nakoplenie povrezhdennosti v metallakh v usloviyakh korrozionnogo rastreskivaniya pod napryazheniem [Accumulation of damage in metals under stress corrosion cracking conditions]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids]. 1997. No 3. P. 115–124 (In Russian).

66. Astafiev V.I., Shiriaeva L.K. *Nakoplenie povrezhdennosti i korrozionnoe rastreskivanie metallov pod napryazheniem* [Accumulation Accumulation and Stress Corrosion Cracking of Metals]. Samara. Samarskiy universitet Publ. 1998. 123 p. (In Russian).

67. Kulagin D.A., Lokoshchenko A.M. Analiz vliyaniya okruzhayushchey sredy na dlitelnuyu prochnost s pomoshch'yu veroyatnostnogo podkhoda [Analysis of the influence of the environment

on long-term strength using the probabilistic approach]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 2001. No 1. P. 124–133 (In Russian).

68. Kulagin D.A., Lokoshchenko A.M. Modelirovanie vliyaniya agressivnoy okruzhayushchey sredy na polzuchest i dlitelnyuyu prochnost metallov pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Modeling the influence of an aggressive environment on the creep and long-term strength of metals under complex stress conditions]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 2004. No 1. P. 188–199 (In Russian).

69. Kulagin D.A., Lokoshchenko A.M. Analysis of the influence of aggressive environment on creep and creep rupture of rod under pure bending. *Archive of Applied Mechanics*. 2005. Vol. 74. Iss. 8. P. 518–525.

70. Lokoshchenko A., Kulagin D. Mutual influence of diffusion and creep rupture processes. *6th International Symposium on Creep and Coupled Processes*. 23–25 Sept. 1998. Bialystok, Poland. 1998. P. 323–332.

71. Lokoshchenko A.M. Opisaniye dlitelnoy prochnosti metallov s pomoshch'yu veroyatnostnoy modeli [Description of the long-term strength of metals using a probabilistic model]. *Vestnik dvigatelestroeniya [Herald of Engine Building]*. 2008. No 3. P. 102–105 (In Russian).

72. Ovchinnikov I.G. Ob odnoy skheme ucheta vozdeystviya korrozionnoy sredy pri raschete elementov konstruktsii [One circuit of the account of the corrosive environment in the calculation of structural elements]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]*. 1984. No 1. P. 34–38 (In Russian).

73. Ovchinnikov I.G. Analiz primenimosti odnoy modeli korrozionnogo razrusheniya k raschetu dolgovechnosti elementov konstruktsiy [Analysis of the applicability of a single model of corrosion damage to the calculation of durability of structural elements]. *Rabotosposobnost materialov i elementov konstruktsiy pri vozdeystvii agressivnykh sred [Performance of Materials and Structural Elements under the Influence of Aggressive Media]*. Saratov. SPTI Publ. 1986. P. 8–10 (In Russian).

74. Petrov V.V., Ovchinnikov I.G., Inozemtsev V.K. Deformirovaniye elementov konstruktsiy iz nelineynogo raznomodulnogo neodnorodnogo materiala [Deformation of Structural Elements from Nonlinear Heterogeneous Material]. Saratov. SPU Publ. 1989. 159 p. (In Russian).

75. Ovchinnikov I.G., Petrov V.V. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa vzaimodeystviya elementov konstruktsiy s agressivnymi sredami [Mathematical modeling of the process of interaction of structural elements with aggressive media]. *Deformirovaniye materialov i elementov konstruktsiy v agressivnykh sredakh [Deformation of Materials and Structural Elements in Corrosive Environments]*. Saratov. SPTI Publ. 1983. P. 3–11 (In Russian).

76. Ovchinnikov I.G. Prochnost i dolgovechnost elementov konstruktsiy v agressivnykh sredakh [Strength and durability of structural elements in aggressive environments]. *Raschet elementov konstruktsiy, podvergayushchikhsya vozdeystvii agressivnykh sred [Calculation of Structural Elements Exposed to Aggressive Media]*. Saratov. SPTI Publ. 1985. P. 7–9 (In Russian).

77. Ovchinnikov I.G., Kolesnikov S.V. *Urvneniye sostoyaniya dlya materiala, podvergayushchegosya vodorodnoy korrozii pri vysokikh temperaturakh i davleniyakh, i ego analiz [Equation of State for a Material Subjected to Hydrogen Corrosion at High Temperatures and Pressures, and its Analysis]*. Saratov. SPTI Publ. 1991. 28 p. (In Russian).

78. Ovchinnikov I.G., Salikov A.Yu., Kolesnikov S.V. Napryazhennoe sostoyaniye i dolgovechnost krugloy plastinki, podvergayushchey vodorodnoy korrozii [Stress and durability of a circular plate subjected to hydrogen corrosion]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoy konferentsii po teorii obolochek i plastin [Proceedings of the 16th International Conference on the Theory of Shells and Plates]*. 21–23 Sept. 1993. Nizhni Novgorod. UNN Publ. 1994. Vol. 3. P. 163–168 (In Russian).

79. Crank J. *The Mathematics of Diffusion*. Oxford. Clarendon Press. 1975. 414 p.

80. Ovchinnikov I.G., Rassada A.B. Model vzaimodeystviya nagruzhennykh elementov konstruktsiy s vodorodosoderzhashchey sredoy i ee prilozheniya [The interaction model of loaded structural elements with a hydrogen-containing medium and its applications]. *Prikladnyye problemy prochnosti i ustoychivosti deformiruemykh sistem v agressivnykh sredakh [Applied Problems of Strength and Stability of Deformable Systems in Corrosive Environments]*. Saratov. SPTI Publ. 1989. P. 12–16 (In Russian).

81. Vilchevskaya E.N., Freidin A.B., Morozov N.F. Kinetics of the chemical reaction front

in spherically symmetric problems of mechanochemistry. *Doklady Physics*. 2015. Vol. 60. No 4. P. 175–179.

82. Korolev I.K., Aleschenko S.P., Freidin A.B., Vilchevskaya E.N. Chislennoe modelirovanie razvitiya fronta khimicheskikh reaktsiy v okrestnosti kontsentratorov napryazheniy v tverdykh telakh [Numerical simulation of the development of the front of chemical reactions in the vicinity of stress concentrators in solids]. *Sbornik trudov XI Vserossiyskogo s'ezda po fundamentalnym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki* [Collection of the Proceedings of the 11th All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics]. Kazan. 20–24 Aug. 2015. P. 1988–1990 (In Russian).

83. Freidin A.B. On the chemical affinity tensor for chemical reactions in deformable materials. *Mechanics of Solids*. 2015. Vol. 50. No 3. P. 260–285.

84. Vilchevskaya E.N., Korolev I.K., Freidin A.B. On phase transitions in a domain of material inhomogeneity. Pt. II. Interaction of a crack with an inclusion experiencing a phase transition. *Mechanics of Solids*. 2011. Vol. 46. Iss. 5. P. 683–691.

85. Freidin A.B., Demidov I.V. Khimicheskoe srodstvo i kinetika fronta khimicheskoy reaktsii v deformiruемом materiale: odnomernyy sluchay [Chemical affinity and kinetics of the front of a chemical reaction in a deformable material: one-dimensional case]. *Sovremennye problemy mekhaniki sploshnoy sredy. Trudy XVIII Mezhdunarodnoy konferentsii* [Contemporary Problems of Continuum Mechanics. Proceedings of the XVIII International Conference]. Rostov-on-Don. 14–17 Oct. 2014. Vol. 1. P. 156–160 (In Russian).

86. Collected works of J.D. Eshelby. *Mechanics of Defects and Inhomogeneities (Solid Mechanics and its Applications)*. Eds. K. Markenscoff, A. Gupta. Berlin. Springer. 2006. 930 p.

87. Eshelby J.D. Energy relations and the energy-momentum tensor in continuum mechanics. *Inelastic Behavior of Solids*. Eds. M.F. Kanninen et al. New York. McGraw-Hill. 1970. P. 77–115.

88. Eshelby J.D. The elastic energy-momentum tensor. *Journal of Elasticity*. 1975. Vol. 5. No 4. P. 321–335.

89. Pavlina V.S., Fedirko V.N., Matychak Ia.S., Tarlupa T.S. Analiz kinetiki sublimatsii i legiruyushchikh elementov splavov s uchetom khimicheskikh prevrashcheniy [Analysis of the kinetics of sublimation and alloying elements of alloys taking into account chemical transformations]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Materials Science]. 1959. Vol. 21. No 6. P. 60–64 (In Russian).

90. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A., Panov V.A., Tryayev P.V. Modelirovanie na osnove sootnosheniy mekhaniki povrezhdennoy sredy protsessov rastreskivaniya pod napryazheniem nerzhavayushchikh staley v usloviyakh agressivnogo vozdeystviya korrozionnykh sred [Modeling cracking processes in stainless steels loaded by pressure and exposed to aggressive effects of corrosion media, using relations of mechanics of damaged media]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2013. Iss. 75. Pt. 2. P. 77–87 (In Russian).

91. Chuvil'deev V.N., Kopylov V.I., Bakhmet'ev A.M., Sandler N.G. et al. Effect of the simultaneous enhancement in strength and corrosion resistance of microcrystalline titanium alloys. *Doklady Physics*. 2012. Vol. 57. No 1. P. 10–13.

92. Rzhantsyn A.R. *Teoriya rascheta stroitelnykh konstruksiy na nadezhnost* [Theory of Calculating Building Structures for Reliability]. Moscow. Stroizdat Publ. 1978. 239 p. (In Russian).

93. Prytkin I.A. O vliyani kharaktera korrozionnogo iznosa i tolshchiny plastiny na raspredelenie napryazheniy v ney [On the effect of the nature of corrosion wear and the thickness of the plate on the stress distribution in it]. *Trudy upravleniya kadrov uchebnykh zavedeniy Ministerstva rybnogo khozyaystva SSSR* [Proceedings of the Personnel Management of Educational Institutions of the Ministry of Fisheries of the USSR]. Moscow. 1972. Iss. 41. P. 64–70 (In Russian).

94. Prytkin I.A. O kontsentratsii napryazheniy v koordinirovannoy plastine korpusa [About stress concentration in a coordinated body plate]. *Trudy Kaliningradskogo instituta rybnoy promyshlennosti i khozyaystva* [Proceedings of the Kaliningrad Institute of Fisheries and Agriculture]. Kaliningrad. 1970. Iss. 33. P. 36–38 (In Russian).

95. Flaks V.Ia. Korroziya stalnykh konstruksiy predpriyatiy chernoy metallurgii [Corrosion of steel structures of ferrous metallurgy enterprises]. *Promyshlennoe stroitelstvo* [Industrial Engineering]. 1966. No 4. P. 21–22 (In Russian).

96. Timashev S.A. Dve novye zadachi nadezhnosti gladkikh i podkreplennykh obolochek

[Two new challenges to the reliability of smooth and reinforced shells]. *Problemy nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii* [Problems of Reliability in Construction Design]. Collection of papers. Sverdlovsk. Ural branch USSR AS Publ. 1972. P. 38–49 (In Russian).

97. Timashev S.A. *Nadezhnost bolshikh mekhanicheskikh sistem* [Reliability of Large Mechanical Systems]. Moscow. Nauka Publ. 1982. 184 p. (In Russian).

98. Magomedov R.M. Raschet nadezhnosti elementov stroitel'nykh konstruksiy, nakhodyashchikhsya pod vozdeystviem korrozii [Calculation of the reliability of elements of building structures exposed to corrosion.]. *Issledovaniya i raschet stroitel'nykh konstruksiy* [Research and Calculation of Building Structures]. Collection of papers. CNIISK named after V.A. Kucherenko. Moscow. 1983. P. 53–58 (In Russian).

99. Raizer V.D. Voprosy nadezhnosti stroitel'nykh konstruksiy pri iznose [Problems of the reliability of building structures in wear]. *Issledovaniya po stroitel'noy mekhanike* [Studies in Building Mechanics]. Collection of papers. Moscow. Nauka Publ. 1985. P. 61–66 (In Russian).

100. Raizer V.D., Ashirov A.I. Ustoychivost sterzhney sluchayno-peremennogo secheniya [Stability of rods of a random variable section]. *Issledovanie po prochnosti i nadezhnosti stroitel'nykh konstruksiy* [Investigation of the Strength and Reliability of Building Structures]. Collection of papers. CNIISK named after V.A. Kucherenko. Moscow. 1988. P. 78–87 (In Russian).

101. Raizer V.D., Magomedov R.M. Nadezhnost i dolgovechnost prostranstvennykh konstruksiy pri iznose [Reliability and durability of spatial structures with wear]. *Primenenie obolochek v inzhenernykh sooruzheniyakh. Trudy Mezhdunarodnogo kongressa po teorii i eksperimental'nym issledovaniyam prostranstvennykh konstruksiy* [Application of Shells in Engineering Structures. Proceedings of the International Congress on the Theory and Experimental Investigations of Spatial Constructions]. Moscow. 1985. Vol. 1. P. 653–666 (In Russian).

102. Mannapov R.G. Otsenka nadezhnosti apparatov v usloviyakh poverkhnostnogo razrusheniya tekhnologicheskimi sredami [Evaluation of the reliability of apparatus in conditions of surface destruction by technological media]. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering]. 1987. No 5. P. 11–12 (In Russian).

103. Mannapov R.G. Metody otsenki nadezhnosti oborudovaniya, podvergayushchegosya sploshnoy korrozii [Methods for assessing the reliability of equipment subjected to continuous corrosion]. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering]. 1989. No 5. P. 27–29 (In Russian).

104. Mannapov R.G. Prognozirovaniye nadezhnosti oborudovaniya putem statisticheskogo analiza ekspluatatsionnykh parametrov [Forecasting equipment reliability by statistical analysis of operational parameters]. *Khimicheskoe i neftyanoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering]. 1990. No 5. P. 1–3 (In Russian).

105. Arutyunian R.A. Veroyatnostnaya model razrusheniya vsledstvie pittingovoy korrozii [Probabilistic model of destruction due to pitting corrosion]. *Problemy prochnosti* [Strength of Materials]. 1989. No 12. P. 106–108 (In Russian).

106. Ovchinnikov I.G. O zadachakh optimal'nogo proektirovaniya konstruksiy, podvergayushchikhsya vozdeystviyu agressivnykh sred [On the problems of optimal design of structures exposed to aggressive media]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1988. No 9. P. 17–20 (In Russian).

107. Magomedov R.M. Nadezhnostnaya optimizatsiya tsilindricheskoy obolochki, podverzhennoy korrozionnomu iznosu [Reliability optimization of a cylindrical shell subjected to corrosive wear]. *Rabotosposobnost materialov i elementov konstruksiy pri vozdeystvii agressivnykh sred* [Working Capacity of Materials and Structural Elements under the Influence of Aggressive Media]. Interuniversity scientific collection. Saratov. SPTI Publ. 1986. P. 58–59 (In Russian).

108. Siemes A.J.M., Vrouwenevelder A.C.W.M., Van Den Benkel A. Durability of buildings: a reliability analysis. *Heron*. 1985. Vol. 11. No 3. P. 2–47.

109. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bogina M.Yu. Modelirovaniye deformirovaniya i razrusheniya materialov v usloviyakh radiatsionnogo oblucheniya s uchetom vliyaniya vida napryazhennogo sostoyaniya. Soobshchenie 1. Ob uchete vliyaniya radiatsionnogo oblucheniya pri postroenii modeley deformirovaniya v radiatsionnykh usloviyakh s primeneniem teorii strukturnykh parametrov [Modeling of deformation and destruction of materials under conditions of radiation exposure, taking into account the influence of the type of stress state. Report 1. On the

account of the effect of radiation exposure in the construction of models of deformation in radiation conditions with the application of the theory of structural parameters]. *Internet-zhurnal Naukovedenie [Internet Journal of Science]*. 2013. No 2. <http://publ.naukovedenie.ru> (In Russian).

110. Ovchinnikov I.G., Bogina M.Yu., Matora A.V. Vliyaniye radiatsionnykh sred na mekhanicheskie kharakteristiki materialov i povedeniye konstruksiy (obzor) [Influence of radiation media on the mechanical characteristics of materials and the behavior of structures (review)]. *Internet-zhurnal Naukovedenie. [Internet Journal of Science]*. 2012. No 4. <http://publ.naukovedenie.ru> (In Russian).

111. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Bogina M.Yu., Matora A.V. Modeli i metody, ispolzuemye pri raschete i modelirovaniy povedeniya konstruksiy, podvergayushchikhsya vozdeystviyu radiatsionnykh sred [Models and methods used in the calculation and modeling of the behavior of structures exposed to radiation]. *Internet-zhurnal Naukovedenie [Internet Journal of Science]*. 2013. No 2. <http://publ.naukovedenie.ru> (In Russian).

112. Lenskii V.S. Vliyaniye radioaktivnykh oblucheniy na mekhanicheskie svoystva tverdykh tel [Influence of radioactive irradiation on the mechanical properties of solids]. *Inzhenerniy sbornik [Engineering Collection]*. 1960. Vol. 28. P. 97–133 (In Russian).

113. Ilyushin A.A., Ogibalov P.M. O prochnosti obolochek tolstostennogo tsilindra i pologo shara, podvergnutykh oblucheniyu [On the strength of shells of a thick-walled cylinder and a hollow ball subjected to irradiation]. *Inzhenerniy sbornik [Engineering Collection]*. 1960. Vol. 28. P. 134–144 (In Russian).

114. Kulikov I.S., Tverkovkin B.E. *Prochnost teplovydelyayushchikh elementov bystrykh gazookhlazhdaemykh reaktorov [Strength of Fuel Elements of Fast Gas-cooled Reactors]*. Ed. V.B. Nesterenko. Minsk. Nauka i tekhnika Publ. 1984. 104 p. (In Russian).

115. Kulikov I.S., Tverkovkin B.E. Prochnostnoy raschet TVELa gazookhlazhdaemogo bystrogo reaktora pri zhestkom kontakte topliva i obolochki [Strength calculation of TVEL gas-cooled fast reactor with rigid contact of fuel and shell]. *Vesti LI BSSR. Seriya fiziko-energeticheskikh nauk [News of LI BSSR. Series of Physical and Energy Sciences]*. 1979. No 2. P. 131 (In Russian).

116. Pisarenko G.S., Kiselevskii V.N. *Prochnost i plastichnost materialov v radiatsionnykh potokakh [Strength and Plasticity of Materials in Radiation Fluxes]*. Kiev. Naukova dumka Publ. 1979. 281 p. (In Russian).

117. Kiselevskii V.N. Ob uravnenii sostoyaniya strukturnoustoychivoy nerzhaveyushchey stali v radiatsionnom pole vysokoy intensivnosti [On the equation of state of structurally stable stainless steel in a high intensity radiation field]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 1974. No 7. P. 30–33 (In Russian).

118. Pisarenko G.S. Vliyaniye reaktornykh izlucheniye na soprotivleniye polzuchesti i dlitel'nyuyu prochnost austenitnoy nerzhaveyushchey stali OX16H15M3B [Influence of reactor radiation on creep resistance and long-term strength of austenitic stainless steel OX16H15M3B]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 1974. No 4. P. 3–8 (In Russian).

119. Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskiy A.A. Prognozirovaniye dlitel'noy prochnosti austenitnykh materialov pri neytronnomy obluchenii [Prognostication of longterm stress-rupture strength of austenitic materials under neutron irradiation]. *Voprosy materialovedeniya [Inorganic Materials: Applied Research]*. 2005. No 2. P. 163–186. (In Russian).

120. Margolin B.Z., Buchatskiy A.A., Gulenko A.G. et al. Novyy metod prognozirovaniya soprotivleniya tsiklicheskomu nagruzheniyu pri vyazkouprugoplasticheskom deformirovaniy i neytronnomy obluchenii [A new method for predicting the resistance to cyclic loading in visco-elastoplastic deformation and neutron irradiation]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 2008. No 6. P. 5–24 (In Russian).

121. Mitenkov F.M., Bolshukhin M.A., Kozin A.V., Korotkikh Yu.G., Panov V.A., Pakhomov V.A., Pichkov S.N. Tekhnologiya ekspluatatsionnogo monitoringa resursa oborudovaniya i sistem YaEU [A technology of operational monitoring of NNP equipment and systems]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2012. Iss. 74. P. 68–77 (In Russian).

122. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A., Vilenskiy O.Yu., Kaydalov V.B., Zverev D.L., Gulenko A.G., Sorokin A.A. Verifikatsiya metodicheskikh i programmnykh sredstv chislennogo issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruksiy iz stali tipa X16H11M3 pri kvazistaticheskikh termoradiatsionnykh nagruzheniyakh [Verification of the methods

and software for numerically studying the stressed-strained state of structures made of the X16H1M3 steel under quasistatic thermal radiation loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2010. Iss. 72. P. 36–45 (In Russian).

123. Khazhinskii G.M. *Povedenie metalla yadernykh reaktorov* [The Behavior of the Metal of Nuclear Reactors]. Moscow. Sputnik+ Publ. 2018. 233 p. (In Russian).

124. Antikain P.A. *Metally i raschet na prochnost kotlov i truboprovodov* [Metals and Strength Calculation of Boilers and Pipelines]. Moscow. Energia Publ. 1980. 424 p. (In Russian).

125. Berukshtis G.K., Klark G.B. *Korroziionnaya ustoychivost metallov i metallicheskih pokrytiy v atmosferynykh usloviyakh* [Corrosion Resistance of Metals and Metal Coatings in Atmospheric Conditions]. Moscow. Nauka Publ. 1971. 160 p. (In Russian).

126. Cohen P. *Water Coolant Technology of Power Reactors*. New York. Gordon and Breach. 1969. 352 p.

127. Mel'nikov G.P. *Dolgovechnost elementov konstruksiy v usloviyakh vysokikh temperatur pri stendovykh ispytaniyakh* [Durability of Structural Elements in Conditions of High Temperatures During Bench Tests]. Moscow. Atomizdat Publ. 1979. 80 p. (In Russian).

128. Nikitin V.I. *Raschet zharostoykosti metallov* [Calculation of the Heat Resistance of Metals]. Moscow. Metallurgia Publ. 1976. 208 p. (In Russian).

129. Ovchinnikov I.G., Ratkin V.V., Zemlianskii A.A. *Modelirovanie povedeniya zhelezobetonnykh elementov konstruksiy v usloviyakh vozdeystviya khloridosoderzhashchikh sred* [Simulation of the Behavior of Reinforced Concrete Structural Elements under Conditions of Exposure to Chloride-containing Media]. Saratov. SSTU Publ. 2000. 232 p. (In Russian).

130. Ovchinnikov I.G., Khval'ko T.A. *Rabotosposobnost konstruksiy v usloviyakh vysokotemperaturnoy vodorodnoy korrozii* [Performance of Structures under Conditions of High-temperature Hydrogen Corrosion]. Saratov. SSTU Publ. 2003. 176 p. (In Russian).

131. Pavlov P.A., Kadyrbekov B.A., Kolesnikov V.A. *Prochnost staley v korroziionnykh sredakh* [Strength of Steels in Corrosive Environments]. Alma-Ata. Nauka Publ. 1987. 272 p. (In Russian).

132. Petrov V.V., Ovchinnikov I.G., Shikhov Yu.M. *Raschet elementov konstruksiy, vzaimodeystviyushchikh s agressivnoy sredoy* [The Calculation of the Elements of Structures Interacting with an Aggressive Environment]. Saratov. SSU Publ. 1987. 288 p. (In Russian).

133. Gutman E.M., Zainullin R.S., Shatalov A.T. et al. *Prochnost gazopromyslovykh trub v usloviyakh korroziionnogo iznosa* [The Strength of the Gas Production Pipes in Terms of Corrosion]. Moscow. Nedra Publ. 1984. 76 p. (In Russian).

134. Romaniv O.N., Nikiforchin G.N. *Mekhanika korroziionnogo razrusheniya konstruksionnykh materialov* [Mechanics of Corrosion Fracture of Structural Materials]. Moscow. Metallurgia Publ. 1986. 294 p. (In Russian).

135. Tsikerman L.Ia. *Diagnostika korrozii truboprovodov s primeneniem EVM* [Diagnostics of Corrosion of Pipelines with the Use of Computers]. Moscow. Nedra Publ. 1977. 319 p. (In Russian).

136. Tsikerman L.Ia. *Dolgosrochnyy prognoz opasnosti gruntovoy korrozii metallov* [Long-term Forecast of Risk of Ground Corrosion of Metals]. Moscow. Nedra Publ. 1966. 175 p. (In Russian).

137. Lokoshchenko A.M. *Metody modelirovaniya vliyaniya okruzhayushchey sredy na polzuchest i dlitelnyuyu prochnost metallov* [Methods of modeling the environmental impact on creep and long-term strength of metals]. *Uspekhi mekhaniki* [Advances in Mechanics]. 2002. Vol. 1. No 4. P. 90–120 (In Russian).

138. Lokoshchenko A.M. *Polzuchest i dlitelnaya prochnost metallov v agressivnykh sredakh (obzor)* [Creep and long-term strength of metals in corrosive environments (Review)]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Materials Science]. 2001. No 4. P. 27–41 (In Russian).

139. Karzov G.P., Markov V.G., Iakovlev V.A. *Sovmestimost konstruksionnykh materialov s teponositelem na osnove svintsya i ego splavov* [Compatibility of structural materials with the coolant based on lead and its alloys]. *Progressivnye materialy i tekhnologii* [Advanced Materials and Technologies]. 1999. No 3. P. 51–56 (In Russian).

140. Kudryavtsev A.S., Kashtanov A.D., Markov V.G., Lavrukhin V.S. *Polzuchest khromistoy martensitnoy stali v teponositele na osnove svintsya* [Creep of chrome martensitic steel in lead-

based coolant]. *Voprosy materialovedeniya [Inorganic Materials: Applied Research]*. 2007. No 1. P. 78–82 (In Russian).

141. Kudryavtsev A.S., Markov V.G., Lavrukhin V.S. Dlitelnaya prochnost stali v zhidkometallicheskoy teplonositeley na osnove svintsya [Long-term strength of steel in a molten metal heat-transfer medium on the basis of lead]. *Voprosy materialovedeniya [Inorganic Materials: Applied Research]*. 2006. No 4. P. 89–94 (In Russian).

142. Ogorodov L.I., Belov A.S. Eksperimentalnaya proverka effektivnosti kineticheskikh uravneniy povrezhdeniy silovogo tipa pri opisaniy dlitelnogo razrusheniya zharoprochnogo splava v agressivnoy srede v usloviyakh nestatsionarnogo nagruzheniya [Experimental verification of the effectiveness of the kinetic equations of damage of a force type in describing the long-term destruction of a heat-resistant alloy in an aggressive medium under conditions of unsteady loading]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 1995. No 3. P. 19–27 (In Russian).

143. Kiazimova R.A., Bagirov E.T. O vremeni korrozionnogo razrusheniya metallov s uchedom vliyaniya mekhanicheskogo napryazheniya i temperatury [On the time of corrosion damage of metals taking into account the influence of mechanical stress and temperature]. *Nauka i konstruirovaniye [Science and Engineering]*. 2010. No 4. P. 64–66 (In Russian).

MODELING THE BEHAVIOR OF MATERIALS AND STRUCTURAL ELEMENTS UNDER THE IMPACT OF AGGRESSIVE ENVIRONMENTS (REVIEW)

Lokoshchenko A.M., Fomin L.V.

*Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russian Federation*

The review of a number of scientific works in the field of modeling processes of interaction of an aggressive medium with materials and structural elements and their behavior under the action of loads is offered. The investigated phenomena are described using theoretical-experimental methods for the further prediction of short-term and long-term strength characteristics of materials and structural elements subject to the influence of an aggressive medium. In view of the complexity of the phenomena under consideration, an interdisciplinary scientific approach is used that takes into account both the physics-chemical interaction of the aggressive medium with materials and the systematization of mechanical-mathematical (phenomenological) models. The main attention is paid to the study and modeling of high-temperature corrosion damage of materials and structural elements. It is taken into account both the diffusion penetration of the aggressive medium and the chemical interaction of its elements with the material. The effect of various factors, such as liquid-metal media and radiation exposure; oxide films formed on corroding surfaces; cracking of stressed stainless steels in the conditions of hydrogen embrittlement, on the corrosion process is presented. The dependence of corrosion rate on the stressed state with elastoplastic deformations also is represented. Publications with various versions of phenomenological models of corrosion wear processes, loss of plasticity and embrittlement in aggressive media are given, as well as publications using the probabilistic-statistic approach to modeling corrosive failure. An extensive list of well-known literature sources, that reflect scientific research taking into account all aspects of interaction of the material with an aggressive environment is given.

Keywords: modeling, physics-chemical models, mechanical-mathematical models, aggressive environment, liquid metal environment, strength, corrosion, corrosion layer, corrosion failure, diffusion, chemical reaction, ionizing radiation, experiment.