

Овчинников Илья Игоревич

Ovchinnikov Ilya Igorevich

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Доцент/docent

05.23.17 Строительная механика

E-Mail: bridgeart@mail.ru

Овчинников Игорь Георгиевич

Ovchinnikov Igor Georgievich

Профессор/professor

05.23.17

E-Mail: bridgesar@mail.ru

Занин Алексей Александрович

Балашовский институт (филиал)

Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского

соискатель

05.23.17

E-Mail: mts@forpost.ru

Зеленцов Дмитрий Гегемонович

Zelentsov Dmytriy Gegemonovitch

Государственное высшее учебное заведение

«Украинский государственный химико-технологический университет»

профессор, заведующий кафедрой

Professor, Head of Department

05.23.17

E-Mail: dmyt_zel@mail.ru

Короткая Лариса Ивановна

Korotka Larysa Ivanovna

Государственное высшее учебное заведение

«Украинский государственный химико-технологический университет»

Ассистент/assistant

05.23.17

E-Mail: korliv@hotmail.com

Проблема оптимального проектирования нагруженных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред (обзор)

Problem of optimum design of the loaded constructions which are exposed to influence of aggressive environments (review)

Аннотация: Рассматриваются постановки задач оптимального проектирования элементов конструкций с учетом воздействия агрессивных сред, которые могут приводить к изменению, как геометрических параметров элементов конструкций, так и механических характеристик материала с течением времени

The Abstract: Statements of problems of optimum design of elements of constructions taking into account influence of aggressive environment which can lead to change, both geometrical parameters of elements of designs, and mechanical characteristics of a material eventually are considered

Ключевые слова: Оптимизация, агрессивная среда, конструкции, коррозия, методы оптимизации, учет коррозии.

Keywords: Optimization, aggressive environment, constructions, corrosion, optimization methods, accounting of corrosion.

Введение

Надежность и долговечность элементов конструкций и технологического оборудования, эксплуатируемого в условиях совместного действия механических нагрузок и агрессивных сред, всегда была и остается в центре внимания инженерной практики. Сегодня значимость и актуальность этой проблемы возрастает, и она приобретает новые акценты в связи с современными тенденциями развития техники: в частности, увеличение единичной мощности машин и повышение эксплуатационных параметров рабочей среды. Последнее обусловлено тем, что освоение прогрессивных технологических процессов и производство новых веществ часто предполагает использование различных агрессивных рабочих сред, которые вызывают преждевременное разрушение элементов конструкций оборудования.

Поскольку условия эксплуатации, связанные с одновременным воздействием агрессивных рабочих сред и нагрузок, характерны для реальных условий эксплуатации металлического оборудования горнодобывающей, нефте-, газо- и химической промышленности, металлургии, строительных конструкций, портовых сооружений, плавсредств и других, то проблема оптимального проектирования элементов конструкций, которые используются в таких условиях, является весьма актуальной. Учитывая высокие требования к экономической целесообразности, надежности и долговечности при минимальной материалоемкости силовых конструкций, создание которых требует современный уровень развития техники, их основные параметры (с учетом соответствующих условий эксплуатации) должны быть определены еще на стадии проектирования. Основой для этого, в первую очередь, должен служить комплекс мероприятий, применяемых еще на стадии проектирования: выбор рациональных конструктивных схем и материалов, надлежащий расчет с учетом всех взаимодействий, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации конструкции. Поэтому в последние десятилетия проблеме оптимального (по разным критериям) проектирования элементов силовых конструкций, условия эксплуатации которых связаны с воздействием агрессивных рабочих сред, уделяется достаточно большое внимание.

1. Особенности воздействия агрессивных сред на нагруженные конструкции

Условия функционирования многих нагруженных конструкций таковы, что при их проектировании и для надлежащей эксплуатации необходим учет воздействия агрессивных сред. Под воздействием агрессивной среды (коррозионным воздействием) понимается процесс постепенного изменения (ухудшения) параметров конструкции при поверхностном контакте с некоторой жидкой или газообразной средой. Характеристики коррозионного процесса определяются главным образом химическим составом пары агрессивная среда - материал конструкции, микроструктурой поверхности материала, температурой и напряженно-деформированным состоянием.

По механизму воздействия коррозионные среды относят к физически или химически активным [1]. Действие физически активных сред, как правило, обратимо и не приводит к разрушению химических связей. Химически активные среды необратимо изменяют структуру и свойства материала, устанавливая химические связи. В монографии [2] приводится разделение коррозионных процессов на избирательную коррозию, щелевую, механо-химическую, электрохимическую, химическую, биологическую и высокотемпературную. По внешнему виду выделяют сплошную коррозию, которая может быть равномерной или неравномерной и местную, объединяющую в себе коррозию пятнами, язвенную, питтинговую, подповерхностную и нитевидную.

На макроуровне взаимодействие с агрессивной средой приводит к изменению во времени физических (сплошность, коэффициент объемного и термического расширения, плотность), механических (упругие константы, пределы текучести, кратковременной и длительной прочности) и геометрических (толщина, размеры) параметров конструкции.

2. Учет влияния агрессивных сред

Необходимость учета коррозии, так или иначе, связывается с проблемой определения долговечности элемента конструкции под действием рабочих нагрузок и сред и, соответственно, с проблемой прочности. Собственно, различные подходы к учету воздействия агрессивных сред, сложившиеся в применении к нагружаемым конструкциям, различаются именно степенью детализации процессов, определяющих изменение прочности материала.

Отметим следующие подходы, в которых указанный учет осуществляется:

1. Методами физико-химической механики материалов. Зависимости для макропеременных (полученных при усреднении по большому числу микрообъектов), таких как напряжения и деформации, получают из анализа физико-химических микропроцессов, определяющих все проявления коррозии.

2. Методами неравновесной термодинамики и механики сплошной среды. Процесс разрушения материала, независимо от причины, его вызвавшей, будь то статическое, циклическое нагружение или воздействие агрессивной среды, рассматривается как термодинамически необратимый, характеризуемый величиной производства энтропии.

3. При помощи линейной механики разрушения. Рассматривается влияние агрессивной среды на развитие дефекта (трещины), изначально имеющейся в материале, вплоть до стадии разделения элемента конструкции на части.

4. С использованием теории структурных параметров на основе механики сплошной деформируемой среды. К обычным параметрам последней добавляются дополнительные макропараметры, отражающие влияние коррозии, с целью привести результаты расчетов в согласие с экспериментом.

Судя по обзорам в работах [3,4], наибольшее распространение при расчетах напряженного состояния и долговечности нагруженных конструкций имеет последний подход. Именно на его основе выполнены все обнаруженные нами исследования по оптимальному проектированию корродирующих конструкций, поэтому ниже основные идеи подхода рассмотрены более подробно [5].

3. Способы введения структурных параметров

При введении дополнительных структурных параметров неизбежны некоторые допущения.

Процесс коррозионного разрушения материала начинается с того, что агрессивная среда, в общем случае многокомпонентная, спустя некоторое время после начала контакта образует в приповерхностной области материала насыщенный слой, от которого среда распространяется в толщу материала. Проникновение может идти как диффузионным, так и капиллярным путем; скорости проникновения компонент могут быть различны. Таким образом, концентрация, химический состав и фазовое состояние среды оказываются зависящими от координат. Тем не менее, считается, что распределение среды в материале можно описать единственным скалярным параметром C , называемым также концентрацией.

Далее, одновременно с проникновением среды начинаются физико-химические реакции ее с материалом конструкции. Зависящие от состава, структуры материала и среды, а также от температуры, напряжений и т.д., эти реакции, в общем случае, состоят из множества элементарных и протекают в несколько стадий. При определенных условиях реакции могут пойти в обратном направлении. Предполагается, однако, что степень завершенности реакций в каждой точке объема, по которой судят о степени изменения свойств материала, можно характеризовать скалярным параметром μ - параметром химического взаимодействия.

Конечным результатом взаимодействия с агрессивной средой является необратимое изменение микроструктуры и химического состава материала, приводящее, с точки зрения механики деформируемого тела, к изменению как его деформативных свойств, так и прочностных свойств элемента конструкции. Для описания остаточного прочностного ресурса вводится параметр поврежденности Π , зависящий от характеристик среды, материала и напряженного состояния в точке таким образом, что $\Pi=0$ для неповрежденного исходного материала и $\Pi=1$ в момент потери материалом несущей способности. При этом обычно считается, что конструкция разрушается при достижении параметром поврежденности условного предельного значения (единицы) хотя бы в одной точке. Хотя все параметры могут вводиться формально, заданием соответствующих кинетических уравнений, определяющих изменение параметров во времени, обычно они наделяются и физическим смыслом. Например, за меру поврежденности, описываемую параметром Π , может приниматься сплошность материала, относительное увеличение объема образца, концентрация микродефектов, величина приращения энтропии, мгновенная прочность материала, относительная величина площади, потерявшей несущую способность и другие. Подчеркнем, что упомянутые параметры являются не просто переменными, изменяющимися со временем, а функциями в общем случае трех пространственных координат.

Указанный базовый набор из 3-х структурных параметров наделен достаточной гибкостью для исследования самых различных вариантов коррозионного поражения. При необходимости он может как расширяться за счет введения дополнительных скалярных параметров, либо преобразования имеющихся скалярных параметров в векторные или тензорные, так и сужаться. Уменьшить количество потребных параметров позволяют априорные данные о характере процессов коррозионного разрушения. Например, в случае, когда характерное время реакций гораздо меньше времени проникновения среды через полную толщину сечения об-

разца и реакции приводят к полной потере несущей и защитной способности внешних слоев материала, процесс можно описать единственным параметром δ - глубиной коррозионного разрушения. Такая ситуация реализуется, как известно, при сплошной поверхностной коррозии металлов.

Закон изменения любого из параметров (Π , для определенности) во времени обычно задается кинетическим уравнением вида: $d\Pi/dt = f(\Pi, \sigma, \epsilon, T, t, \mu, C)$, где σ, ϵ - некоторые скалярные эквивалентные напряжения и деформации; T - температура и t - время. Кроме того, эти уравнения определяют зависимость введенных структурных параметров C, μ, Π от характеристик σ, ϵ напряженно-деформированного состояния. Для задания обратной зависимости и образования замкнутой и связной системы вводится так называемое реологическое уравнение состояния следующего общего вида: $\Phi(\sigma, \epsilon, d\sigma/dt, d\epsilon/dt, T, \Pi, C, \mu) = 0$. Как правило, последнее уравнение видоизменяет, или дополняет систему физических соотношений, связывающих напряжения в материале с деформациями.

Отдельной проблемой является определение конкретного вида кинетических и реологического уравнений (структурная идентификация), а также задание значений констант, входящих в эти уравнения (параметрическая идентификация). Решение первой из указанных задач опирается на имеющуюся априорную информацию о физике протекающих процессов и в большой степени зависит от искусства исследователя. Дело облегчается наличием множества готовых моделей для самых разных ситуаций [2, 3, 4]. Вторая задача сводится к использованию методов интерполирования функций и имеющихся экспериментальных данных типа кривых длительной прочности, ползучести в агрессивной среде к задаче параметрической оптимизации.

4. Обзор постановок задач оптимального проектирования

Перейдем к рассмотрению имеющихся публикаций, посвященных оптимальному проектированию конструкций под воздействием агрессивных сред.

В целом ряде работ [6 - 20] также представлена обширная библиография и точка зрения авторов на состояние проблемы оптимального проектирования элементов силовых конструкций, условия эксплуатации которых связаны с воздействием агрессивных сред в целом.

В частности, в монографии И. Г. Овчинникова, Ю. М. Почтмана [4] собраны сведения о различных видах моделей коррозионного износа с указанием возможных областей их применения, описана методика их идентификации, а также алгоритмы их численной реализации и результаты расчетов, которые можно использовать как тестовые примеры при проектировании и проведении исследований прочности, устойчивости и долговечности конструкций с учетом реальных условий их эксплуатации, а влияние коррозионной среды предлагается проводить путем включения процесса взаимодействия материала конструкций со средой в расчетную схему конструкции. Значительное внимание уделено проблеме оптимального проектирования конструкций в условиях статической нагрузки и коррозионного износа. Некоторые предложения по определению долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой, изложены в статье [3].

В монографиях Е. М. Гутмана [6, 7] приведены закономерности механического и химического разрушения толстостенных труб при нахождении их в коррозионной среде, которые могут быть весьма полезными в качестве справочника при проведении современных исследований и эксплуатации таких конструкций в подобных условиях.

В работах [21, 22, 23, 17] рассмотрены аспекты прочности проблемы взаимодействия элементов силовых конструкций с коррозионными средами и вопросы оптимизации их пара-

метров. Исследование влияния агрессивных сред и напряжений на параметры локальных коррозионных процессов проводились в [24, 25, 26, 27, 28].

Ряд подходов и алгоритмов оптимального проектирования балочных конструкций и решения задач долговечности несущих балок предложенные в [29, 30].

В [3] рассмотрен достаточно общий подход к учету действия коррозионных сред при расчете конструкций и примеры его применения к анализу поведения их простых элементов. Кроме того, уделено внимание вопросу коррозионного растрескивания и проблеме коррозионной усталости, а также расчетного и экспериментального оценивания циклической прочности, долговечности и трещиностойкости материалов и деталей машин, находящихся на открытом воздухе и в ряде коррозионных сред.

В работе [31] обсуждена проблема многокритериального подхода при решении оптимизационных задач.

В [32] используется аппроксимация формы боковых граней прямоугольного сечения балок, которые имеют невыпуклого поперечное сечение, фрагментами прямых или кривых линий. Численная иллюстрация предложенного подхода проведена для балки стандартного двутаврового профиля.

Несмотря на то, что информация о природе коррозионного процесса и закон и параметры его распределения в реальных ситуациях является неполной, а, следовательно, коэффициенты, входящие в математических моделей, являются условными, в работе [33] предложен подход к решению задач оптимизации конструкций. Этот подход был развит в [34], где изложена предложение использовать элементы теории нечетких множеств для учета неопределенности параметров. При этом неопределенные параметры предлагается рассматривать в виде интервалов, а не четких значений, а затем выбрать наиболее удовлетворительный вариант.

Подход, изложенный в [35], позволяет с достаточной степенью достоверности описать процесс коррозионного разрушения широкого класса тонкостенных конструкций типа балок-стенок, пластин и оболочек, и оценить их долговечность и НДС в произвольный момент времени. В качестве примера в работе рассмотрена задача расчета НДС и долговечности квадратной изотропной балки-стенки, находящейся под воздействием агрессивной среды. Решение задачи осуществляется с помощью метода конечных элементов с предположения однородности характера воздействия агрессивной среды на каждый i -й конечный элемент.

Разработке принципов и методов оптимального проектирования конструкций (ОПК) с учетом коррозионной деградации посвящен целый ряд работ [36, 38, 39, 7, 33, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 3, 51 – 54, 55 – 57, 37], в которых определяются пути снижения материалоёмкости конструкций, предназначенных для эксплуатации в агрессивных средах.

В [36] разработан эффективный дискретный метод решения задач оптимального проектирования стержневых систем, которые взаимодействуют с агрессивной средой. Используется алгоритм, позволяющий отслеживать локальные экстремумы и выбор стартовых точек и приводить траекторию движения до экстремума вдоль поверхности ограничений.

В [37] рассмотрена возможность применения стохастического метода поиска к нахождению оптимальных параметров конструкций, находящихся в условиях коррозии.

Автором [58] предложена методика оптимального проектирования подкрепленных пластин в агрессивной среде, с помощью которой исследуется влияние технологии изготовления таких конструкций на оптимальный объем их материала. Из анализа приведенных в работе результатов следует, что для случая общей коррозии сварного соединения, игнорирование способа соединения подкрепления и основного листа на стадии проектирования может при-

вести к аварийной ситуации вследствие недопустимого уменьшения запаса прочности полученной конструкции в результате коррозии.

В [59] рассмотрена задача проектирования конструкций с заданным временем функционирования. Поиск параметров наиболее эффективной технической системы проводится с использованием методов математического и стохастического программирования. Приведены результаты численного эксперимента для проектирования статически неопределимой шарнирно-стержневой конструкции по показателям прочности, расхода материала, жесткости, устойчивости, коррозии и различных видов нагрузки.

В [60] предложена расчетно-экспериментальная методика определения долговечности элементов конструкций в агрессивной среде, а в [97] приведены некоторые соображения о возможности определения скорости коррозии металла за изменением pH у его поверхности.

Ряд работ [61, 62, 63, 64, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 65, 52, 53, 66, 67,68] посвящен разработке, сравнению и обоснованию выбора математических моделей коррозионной деградации конструкций.

Проблема идентификации математических моделей коррозионного разрушения конструкций и вычислительные особенности этой проблемы при оптимальном проектировании конструкций обсуждались в [64, 69, 67, 68].

Авторами [70] сформирована оригинальная математическая модель весовой оптимизации, которая включает коэффициент влияния периметру и позволяет уменьшить вычислительные затраты.

В работе [71] предложена оптимизационная модель расчета конструкций с ограниченной долговечностью, подвергающихся воздействию агрессивной среды. Критерием оптимальности выбран минимальный вес конструкции, а условием остановки оптимизационного процесса считается достижение конструкцией одновременно состояния физического и морального износа. Предложенная методика продемонстрирована на примерах оптимального проектирования сварной двутавровой балки и сжатой в осевом направлении гладкой цилиндрической оболочки.

Работа [72] посвящена разработке новых математических моделей, описывающих процесс коррозионного разрушения в балках во время совместной действия изгиба и растяжения (сжатия). В данной работе предлагается также новый метод поиска оптимальных проектов стержневых систем, взаимодействующих с агрессивной средой.

Работа [51] посвящена разработке и исследованию моделей оптимального проектирования нагруженных цилиндрических оболочек с учетом коррозии и поврежденности материала.

Математические модели соответствующих оптимизационных задач в терминах задач нелинейного математического программирования (НЛП) формулировались в [73, 64, 45, 74, 75, 56, 76, 77, 78, 66, 67, 79] и реализовывались или (в большинстве случаев) численно [38, 39, 80, 42, 45, 81, 54, 56, 57, 82, 83] или с применением аналитических методов оптимизации [41, 52]. В качестве таких методов использовались необходимые и достаточные условия оптимальности Куна-Таккера и метод множителей Лагранжа. При численном решении оптимизационных задач выбор того или иного метода определялся, как правило, спецификой решения задачи. В основном использовались такие методы, как динамическое программирование [54, 82], метод случайного поиска с самообучением [38, 39, 84, 45, 85, 86, 55-57], метод штрафных функций, метод проекции градиента [80, 42, 47], метод покоординатного спуска [83], метод скользящего допущения [43, 45], генетический алгоритм [87] и другие.

В значительном количестве работ [88, 40, 88, 89, 90, 45, 91, 75, 92, 55, 57] для расчета НДС конструкций авторы используют метод конечных элементов, причем в некоторых из них жесткость элементов считается переменной [69].

В [89] с помощью предложенной методики оптимального проектирования подкрепленных пластин с учетом коррозионного износа, исследовано влияние технологии изготовления (в данной работе рассмотрен сварки) таких конструкций на их оптимальный объем. Обсуждается вероятность образования локальных участков коррозионного поражения сварных швов.

В диссертационной работе [93] разработаны методы расчета НДС и долговечности стержневых систем, функционирующих в агрессивной среде, а также модель сезонной смены температуры. В работе сформулированы некоторые рекомендации по применению разработанных методов в инженерной практике.

В работе [46] уделено внимание учету неравномерности коррозионного износа при построении математических моделей и предложенный вариант математической модели, которая учитывает указанную особенность для оптимизации нагруженных тонкостенных оболочек. В качестве модельной конструкции рассматривается шарнирно опертая на торцах гладкая цилиндрическая оболочка, нагруженная сжимающей силой.

Обоснование выбора математических моделей, описывающих процесс коррозионного износа в металлических элементах конструкций, обсуждается в [44]. Рассмотрен общий случай коррозионного износа, когда скорость коррозии является функцией механических напряжений. Показано, что для моделирования коррозионных процессов в нагруженных конструктивных элементах может быть применена единая математическая модель, дает возможность разработки единого подхода к построению алгоритма учета коррозии.

Особенности использования при решении оптимизационных задач различных математических моделей проанализированы в работе [76].

Ряд публикаций посвящен проблемам оптимального проектирования отдельных видов конструкций. В работах [94, 36, 93, 38, 39, 62, 95, 84, 42, 96, 97, 98, 99, 45, 81, 48, 2, 54, 55-57, 82, 83] рассмотрены задачи выбора оптимальных параметров стержней и стержневых систем, испытывающих коррозионного воздействия под действием различных видов рабочих агрессивных сред (влажная воздушная среда, электролиты, среды, содержащие водород) и типов стержневых элементов.

Долговечность стержневых конструкций исследуется в [39, 100, 101, 102, 103, 104, 97, 99, 22, 45, 74, 81, 48, 105].

Прямолинейные, постоянного сечения стержни, составляющие систему, разделяются на центрально-сжатые и центрально-растянутые. Действие агрессивной среды приводит к изменению во времени следующих структурных параметров: расчетного сопротивления σ_b материала, площади S поперечного сечения и коэффициента продольного изгиба (для сжатых стержней), по идентичным законам, которые задаются кусочно-линейными функциями времени и учитывают работу защитного слоя на начальном этапе. Формулируется задача параметрической оптимизации: найти минимум отношения объема системы к долговечности при ограничении по несущей способности стержней, которая для сжатых стержней вводится с помощью коэффициента продольного изгиба. Долговечность рассматриваемых статически определимых систем ограничивается отказом хотя бы одного из стержней. Методом случайного поиска получены оптимальные геометрические параметры сечений стержней двухстержневой консольной системы.

В [106] путем проведения сравнительного анализа различных постановок задач оптимизации изгибных стержней, находящихся в агрессивной среде, установлен факт влияния пе-

риметру сечения на его оптимальные параметры. В работе получены качественные и количественные зависимости вида активных ограничений, параметров конструкции и агрессивной среды на величину этого коэффициента.

Решения оптимизационных задач учета изменения формы поперечных сечений стержней в условиях изгиба приведены в работах [84, 42, 83].

Задачи выбора оптимальных размеров поперечных сечений и долговечность, а также особенности исследования нагруженных статически неопределимых стержневых конструкций рассматриваются в работах [39, 98, 107, 81, 47, 108, 55, 59]

Изучению коррозионно-механического поведения балочных конструкций, работающих в химически агрессивных средах, посвящены публикации [93, 38, 39, 7, 62, 29, 84, 80, 42, 106, 103, 96, 97, 99, 30]/

Так, авторам [103] для определенного ряда сечений удалось получить аналитические выражения для функций угловых и линейных перемещений поперечных сечений некоторой статически определенной балки ограниченной жесткости при поперечном нагружении в агрессивной среде с учетом влияния механических напряжений на скорость коррозионного поражения и изменения первоначальной формы этих поперечных сечений.

Согласно результатам проведенных авторами исследований, на примере задачи весовой оптимизации балки, в [33] предложен подход, что дает возможность прогнозирования поведения конструкции в агрессивной среде.

В работах [54,82] проводилось обсуждение весовой оптимизации валов, работающих на кручение в водородной среде при обеспечении выполнения параметрами вала требований прочности, жесткости и долговечности. Решение задачи оптимизации производится средствами аппарата динамического программирования.

Оптимальному проектированию подкрепленных пластин и оболочек, которые испытывают коррозионного разрушения, посвящены работы [109, 110, 111, 112, 73, 113, 114, 101, 102, 104, 22, 23, 115, 91, 74, 75, 116, 117, 46, 4, 51, 118,119, 120, 77, 121]/

В этих работах предлагаются методики оптимального проектирования цилиндрических оболочек, подкрепленных двумя перпендикулярными системами ребер - стрингерами и шпангоутами. Ограничения по прочности и устойчивости наследуют свой вид от аналогичных ограничений для гладких оболочек, однако теперь в них вводится система критических напряжений потери устойчивости, определяемых с учетом дискретного характера подкреплений. Затем в рамках нелинейного программирования методом случайного поиска с учетом сформулированных ограничений ищется минимум средней скорости потери массы конструкции. Используемый критерий оптимизации дает, по мнению авторов, оболочку с минимумом отношения начальной массы к долговечности. Учет влияния коррозии производится с помощью параметра поврежденности, изменение во времени которого описывается либо логистической кривой, либо степенной зависимостью. Величина параметра поврежденности определяет глубину разрушения внешней обшивки или, кроме того, степень изменения модуля упругости и коэффициента Пуассона материала. Проверка выполнения ограничений проводится только по конечному состоянию, так как предполагается, что со временем состояние конструкции, понимаемое как максимальная рабочая нагрузка или прочностной резерв, монотонно ухудшается. В ходе оптимизации варьируются количество и толщина стрингеров и шпангоутов, толщина обшивки и расчетная долговечность. Расчеты выявили наряду со такими свойствами оптимальных проектов, которые согласуются с элементарными соображениями, также одну интересную особенность, не нашедшую должного объяснения. Как известно, в уравнение логистической кривой входит параметр, задающий максимальную глубину δ_m коррозионного раз-

рушения. Оказалось, существует двумерная область в координатах глубины δ_m и внешней нагрузки P , в которой увеличение глубины разрушения приводит к равномерному уменьшению начальных толщин ребер и обшивки оптимального проекта с неизменными остальными параметрами.

Выше приводились задачи оптимизации в детерминистической постановке. Однако, ввиду сложности микропроцессов взаимодействия материала с агрессивной средой, вполне оправданным может быть применение на макроуровне вероятностного подхода. Такая возможность используется в публикации [122] в применении к оптимальному проектированию цилиндрических резервуаров, подверженных питтинговой коррозии. Вертикальный резервуар считается составленным по высоте из нескольких круговых поясов с толщиной стенки, растущей сверху вниз по линейному закону. Резервуар нагружается внутренним гидростатическим давлением агрессивной жидкой среды, вызывающей коррозию внутренней стенки. Поверхность материала каждого пояса в начальном состоянии покрыта питтингами, глубина которых считается гауссовской случайной величиной со средним значением и дисперсией, пропорциональными толщине стенки пояса. Воздействие агрессивной среды приводит к равномерному во времени и пропорциональному уровню напряжений росту глубины имеющихся питтингов; новых питтингов не образуется. Выход любого из питтингов за толщину стенки трактуется как авария, обрывающая срок службы. Вводится функция надежности, определяемая как вероятность безаварийной работы заданной конструкции в течении заданного времени. При ограничении на нижнее значение функции надежности ищется максимум целевой функции на множестве варьируемых параметров, включающих толщину нижнего пояса (которая определяет толщины остальных поясов), количество поясов, расчетные сопротивления металла оболочки и время эксплуатации. Целевая функция состоит из слагаемых, учитывающих средний доход за время эксплуатации, начальную стоимость и ущерб от отказа. При этом предполагается, что резервуар, в начальном состоянии удовлетворяющий требованиям по прочности и устойчивости, не теряет этого свойства и в дальнейшем. В ходе проектирования рассматриваются, естественно, только такие резервуары. Следует отметить это исследование как попытку создания практически применимой схемы оптимального проектирования.

При расчете больших резервуаров авторы [53] предположили, что интенсивность напряжений σ_i в окрестности питтинга, определяющая скорость его роста, является возрастающей функцией его глубины и зависит, помимо прочего, от гидростатического давления хранимой жидкости и веса поясов выше данного питтинга. Толщины поясов оптимального проекта определяются теперь с учетом следующего принципа равнонадежности: вероятность превышения за данное время величиной интенсивности σ_i напряжений предела прочности в окрестности питтинга не должна зависеть от расположения питтинга (начальная глубина которого, как и прежде, - случайная величина). На следующем этапе рассмотрение коррозии совершенствуется за счет введения величины поврежденности материала, также имеющей случайные начальные значения.

В завершение упомянем работу [123], касающуюся проектирования оптимальных по долговечности элементов конструкций с учетом ползучести, поскольку разрушение материала в процессе ползучести учитывается авторами с помощью параметра поврежденности таким же образом, как это делается при коррозионном разрушении. Для решения задачи оптимизации составляется система уравнений статики, неразрывности деформаций и физических соотношений теории упругости, дополняемая уравнениями ползучести и накопления повреждений, которая позволяет дать решение прямой задачи. Как обычно, вводятся ограничения прочностной и технологической природы на параметры проектирования и параметры состояния системы. В ходе оптимизации, что интересно, ищется максимум критерия качества - суммарной по объему поврежденности материала на некоторый момент времени. То есть, по мнению авторов, "тело оптимально, если его материал за время эксплуатации максимально

выработает свой ресурс", не разрушившись при этом ни в одной точке. В подтверждение работоспособности критерия приводятся профили оптимальной изгибаемой балки, вращающегося диска и др., дающие существенную экономию веса по сравнению с прямоугольными образцами той же долговечности.

Заключение

Во всех работах исследуются элементы конструкций из линейно-упругого, однородного материала. Реологические свойства материала, за редким исключением, не учитываются. Основная масса работ посвящена гладким и подкрепленным круговым цилиндрическим оболочкам. Кроме них, оптимальному проектированию подвергаются стержневые системы, балки и пластины.

Учет коррозионных явлений производится через введение либо параметра глубины коррозионного поражения δ , либо параметра поврежденности материала Π вместе с концентрацией C агрессивной среды.

Необходимость учета поведения конструкции во времени привела к модификации обычно используемых при оптимизации нагруженных конструкций функционалов цели. В рассмотренных работах, кроме минимума массы в начальный момент времени, используются минимум отношения веса конструкции к долговечности, минимум средней скорости потери массы конструкции, требование равноповрежденности к концу срока службы, минимум полных затрат на изготовление и эксплуатацию.

Что касается критериев предельного состояния конструкции, то в подавляющем большинстве работ возможность развития трещин в материале исключается. Считается, что разрушение конструкции наступает либо от потери устойчивости, либо в момент превышения некоторым прочностным параметром в какой-либо точке конструкции опасного значения. В качестве такого параметра обычно выступает либо мгновенная прочность σ_b , зависящая от поврежденности материала, либо сам параметр поврежденности Π .

ЛИТЕРАТУРА

1. Перлин С.М., Макаров В.Г. Химическое сопротивление стеклопластиков. - М.: Химия, 1983. - 184 с.
2. Петров В.В., Овчинников И.Г., Шихов Ю.М. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой. - Саратов: изд-во СГУ, 1987. - 288 с.
3. Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Расчет и рациональное проектирование конструкций, подвергающихся коррозионному износу. // ФХММ. 1991. №2 - С. 7-19
4. Овчинников И.Г., Почтман Ю.М. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация. - Днепропетровск: изд-во ДГУ, 1995. - 192 с.
5. Овчинников И.И., Мигунов В.Н. Применение теории структурных параметров к моделированию взаимодействия железобетонных элементов конструкций транспортных сооружений с агрессивными средами // Дороги и мосты. М. Росдорнии. 2012. Вып.27.
6. Гутман Э. М. Прочность газопромысловых труб в условиях коррозионного износа / [Э. М. Гутман, Р. С. Зайнулин, А. Т. Шаталов и др.]. – М. : Недра, 1984. – 80 с.
7. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э. М. Гутман, изд-во 2-е. – М. : Металлургия, 1981. – 270 с.
8. Зеленцов Д. Г. Обзор исследований по применению методов нелинейного математического программирования к оптимальному проектированию конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / Д. Г. Зеленцов, Г. В. Филатов // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : УГХТУ, 2002. – №4. – С. 108 – 115.
9. Зеленцов Д. Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы / Д. Г. Зеленцов. – Днепропетровск : УГХТУ, 2006. – 168 с.
10. Карпунин В. Г. Исследование изгиба и устойчивости пластин и оболочек с учетом сплошной коррозии : дис. ... канд. техн. наук : 05. 23. 17 / В. Г. Карпунин, Свердловск. – 1977. – 186 с.
11. **Овчинников И. Г. Расчет и рациональное проектирование конструкций, подвергающихся коррозионному износу : обзор / И. Г. Овчинников, Ю. М. Почтман // Физико-хим. механика материалов : зб. наук. праць. – Львів. – 1991. – Т. 27, № 2. – С. 7–19.**
12. Овчинников И. Г. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация / И. Г. Овчинников, Ю. М. Почтман. – Днепропетровск : ДГУ, 1995. – 192 с.
13. Овчинников И. Г. Расчет и оптимальное проектирование конструкций, подверженных коррозионному износу / И. Г. Овчинников, Ю. М. Почтман. – Днепропетровск : ДНУ, 1994. – 112 с.
14. Петров В. В. Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В. В. Петров, И. Г. Овчинников, Ю. М. Шихов. – Саратов : изд-во Саратов. ун-та, 1987. – 285 с.
15. **Петров Л. Н. Коррозионно-механическое разрушение металлов и сплавов / Л. Н. Петров, Н. Г. Сопрунюк. – К. : Наук. думка, 1991. – 216 с.**
16. Почтман Ю. М. Разработка и исследование моделей оптимального проектирования нагруженных цилиндрических оболочек с учетом коррозии и поврежденности материала / Ю. М. Почтман // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : Навчальна книга, 1997. – Т. 1. – с. 123.

17. Почтман Ю. М. Методы расчета надежности и оптимального проектирования конструкций, функционирующих в экстремальных условиях / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман. – Днепропетровск : Наука и образование. – 1997. – 134 с.
18. Galvele J. R. Review of stress corrosion cracking / J. R. Galvele // *Bol. Acad. Nac. Cienc.* – 1980. – Vol. 54. – N 1–4. – P. 76–96.
19. Perge Ph. A review of stress corrosion cracking experience in water cooled reactions / Ph. Perge // *Eff. Environ. Mater. Prop. Nucl. Syst.* – 1975. – N 1. –P. 73–78.
20. Sharland S. M. A review of theoretical modeling of crevice and pitting corrosion / S. M. Sharland // *Corros. Sci.* – 1987. – 27, N 3. – P. 289–323.
21. Егоров Е. А. Проблемы нормативного обеспечения надежности строительных металлоконструкций / Е. А. Егоров // *Вісн. Придніпровської державної академії будівництва та архітектури.* – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2008. – № 10. – С. 6–12.
22. Карпунин В. Г. Долговечность пластин и оболочек в условиях коррозионного воздействия среды / В. Г. Карпунин, С. И. Клещев, М. С. Корнишин // *Прочность и долговечность конструкций.* – К. – 1980. – С. 38 – 45.
23. Карпунин В. Г. К расчету пластин и оболочек с учетом общей коррозии / В. Г. Карпунин, С. И. Клещев, М. С. Корнишин // *Тр. 10-й Всесоюзной конф. по теории оболочек и пластин, [Тбилиси : Мецниереба], 1975. – Т. 1. – С. 166 – 174.*
- 24. Дмитрах І. М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І. М. Дмитрах, В. В. Панасюк. – Львів : НАН України. Фізико-механічний ін-т ім. Г. В. Карпенка. – 1999. – 341 с.**
- 25. Дмитрах І. М. Вплив розтягуючих напружень на параметри корозійних процесів в модельних тріщинах-щілинах // Физ. -хим. механика материалов : зб. наук. праць. – Львів. – 1990. – №4. – С. 22–25.**
- 26. Brown B. F. Methods for studying the solution chemistry within stress corrosion cracks / B. F. Brown, C. T. Fujii, E. P. Dahederg // *J. Electrochem. Soc.* – 1969. – 116. – № 2. – P. 218–219.**
- 27. Carter C. S. Stress corrosion branching in high strength steels / C. S. Carter // *Eng. Fract. Mech.* – 1971. – N 3. – P. 1–13.**
- 28. Dmytrakh I. M. Determination and prediction of corrosion fatigue cracks nucleation from surface of the semicircular notches / I. M. Dmytrakh, V. V. Panasyuk // *Proc. European Conf. on Fracture (ECF-12), (14–18 Sept., 1998), Sheffield, UK : EMAS.* – 1998. – P. 1187–1192.**
29. Егоров Е. Применение компьютерных технологий для определения деформационных параметров гофрированных балок / Е. Егоров, Ю. Федоряка, Л. Купневич // *Теоретические основы строительства // Theoretical Foundations of Civil Engineering.* – Warsaw. – 2012. – V. 20. – P. 347–350.
30. Солодка Н. О. Несуча здатність та оптимальне проектування балочних конструкцій з урахуванням впливу агресивних середовищ : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.17 / Солодка Наталя Олександрівна; Відкрите акціонер. т-во "Укр.н.-д. та проект. ін-т сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського". – К. : [б. и.], 2003. - 19 с. - Б. ц.
31. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование изгибаемых элементов конструкций при комбинированном подходе к учету коррозии и защитных свойств покрытий / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман // *Теоретические основы строительства // Theoretical Foundations of Civil Engineering.* – Warsaw. – 2000. – N 8. – P. 518 – 521.

32. Зеленцов Д. Г. Исследование долговечности нагруженных балок двутаврового сечения, подверженных коррозионному износу / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 1999, вып. 9. – Ч. 1. – 29–35.

33. Зеленцов Д. Г. Модели решения задач весовой оптимизации корродирующих конструкций при нечеткой исходной информации [Электронный ресурс] / Д. Г. Зеленцов, Л. И. Короткая // SAIT 2010 : материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф. – Электрон. дані. – К. : УНК “ИПСА” НТУУ “КПИ”, 2010. – С. 89. – Режим доступа: http://sait.org.ua/books/sait2010_ebook.pdf. – Назва з титул. екрану.

34. Зеленцов Д. Г. Учет влияния нечетких параметров агрессивной среды в оптимальном проектировании строительных конструкций [Электронный ресурс] / Д. Г. Зеленцов, А. А. Радуль, О. А. Радуль // SAIT 2010 : материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф. – Электрон. данные. – К. : УНК “ИПСА” НТУУ “КПИ”, 2010. – С. 91. – Режим доступа: http://sait.org.ua/books/sait2010_ebook.pdf. – Назв. с титул. екрана.

35. Зеленцов Д. Г. К вопросу о влиянии агрессивных сред на долговечность и напряженно-деформированное состояние тонкостенных конструкций / Д. Г. Зеленцов // Методы решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела : сб. науч. праць. – Дніпропетровськ. – 1989. – С. 51 – 54.

36. Алексеенко Б. Г. Метод дискретной оптимизации стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами / Б. Г. Алексеенко // Системні технології : сб. науч. праць. – Днепропетровск. – 2001. – № 5. – С. 77 – 85.

37. Филатов Г. В. Стохастический метод поиска глобального экстремума функции с управляемыми границами интервала оптимизируемых параметров / Г. В. Филатов // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : УГХТУ, 2000. – № 1. – С. 334–338.

38. Алексеенко Б. Г. Расчет и оптимальное проектирование рамных систем, подверженных коррозионному износу / Б. Г. Алексеенко // Математические методы в задачах расчета и проектирования сложных механических систем. – К. : АН Украины, Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова, 1992. – С. 4 – 10.

39. Губенко В. С. Определение оптимальных параметров и долговечность стержневых систем, подверженных влиянию агрессивной среды / В. С. Губенко, Ю. М. Почтман, Т. М. Криворучко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – №3. – С. 22 – 25.

40. Зеленцов Д. Г. Моделирование внешних нагрузок в задачах расчета корродирующих плосконапряженных пластин / Д. Г. Зеленцов, Т. С. Науменко // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 2007. – №4. – С. 147 – 149.

41. Зеленцов Д. Г. Модели и методы оптимизации конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Труды VI Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. – Ташкент : ФАН, 1986. – С. 292 – 293.

42. Зеленцов Д. Г. Модели и методы снижения металлоемкости стержневых конструкций, работающих в агрессивных средах / Д. Г. Зеленцов, Н. А. Солодка // Системні технології : регіон. міжвуз. сб. науч. праць. – Дніпропетровськ. – 2000. – Вип. 2(10). – С. 90 – 96.

43. Зеленцов Д. Г. Использование метода скользящего допущения при решении задач оптимального проектирования конструкций с учетом воздействия агрессивных сред / Д. Г. Зеленцов, Н. Ю. Науменко // Вопр. химии и хим. технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 2003. – № 3. – С. 158 – 162.

44. Зеленцов Д. Г. Обґрунтування вибору математичних моделей, які описують процес корозії під напругою в металевих елементах конструкцій / Д. Г. Зеленцов, Т. С. Казанцева // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 2003. – №2. – С. 146 – 148.

45. Колесник И. А. Об одном подходе к решению задачи долговечности статически определимых ферм, функционирующих в химически активных средах // И. А. Колесник, Д. Г. Зеленцов, Ю. А. Храпач // Техническая механика : науч. журнал. – Днепропетровск. – 2002. – №1. – С. 95 – 99.

46. Макуха Н. В. Математические модели оптимизации тонкостенных оболочек с учетом неравномерности коррозионного износа / Н. В. Макуха // Автоматизация решения задач прочности и оптимального проектирования конструкций. – К. – 1991. – С. 45 – 49.

47. Малов В. Ю. Об одной модели коррозионного разрушения элементов конструкций и ее использования в задачах оптимального проектирования / В. Ю. Малов, Ю. М. Почтман // Методы прикладной математики в машиностроении. – К. : Ик АН УССР, 1988. – С. 62 – 67.

48. Овчинников И. Г. Об одной модели коррозионного разрушения / И. Г. Овчинников // Механика деформ. сред. – Саратов : СГУ, 1979. – Вып. 6. – С. 183 – 188.

49. Овчинников И. Г. О методологии построения моделей конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами / И. Г. Овчинников // Долговечность материалов и элементов конструкций в агрессивных и высокотемпературных средах. – Саратов : СПИ, 1988. – С. 17–21.

50. Овчинников И. Г. О задачах оптимального проектирования конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред / И. Г. Овчинников // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1988. – №9. – С. 17 – 20.

51. Почтман Ю. М. Разработка и исследование моделей оптимального проектирования нагруженных цилиндрических оболочек с учетом коррозии и поврежденности материала / Ю. М. Почтман // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. праць.– Дніпропетровськ : Навчальна книга, 1997. – Т. 1. – с. 123.

52. Почтман Ю. М. Некоторые модели задач оптимизации конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами / Ю. М. Почтман, Д. Г. Зеленцов // Докл. АН УССР. Сер. А. – 1987. – №12. – С. 39 – 43.

53. Почтман Ю. М. Методы расчета надежности и оптимального проектирования конструкций, функционирующих в экстремальных условиях / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман. – Днепропетровск : Наука и образование. – 1997. – 134 с.

54. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование скручиваемых стержней, взаимодействующих с агрессивной средой / Ю. М. Почтман // Хим. машиностроение. – 1987. – №47. – С. 3 – 9.

55. Почтман Ю. М. Оптимизация стоимости и долговечности стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами / Ю. М. Почтман, Б. Г. Алексеенко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1991. – №8. – С. 14 – 17.

56. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами, на основе метода конечных элементов / Ю. М. Почтман, Б. Г. Алексеенко, Д. Г. Зеленцов // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 1991. – Вып. 59. – С. 72 – 76.

57. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование стержневых систем, функционирующих в агрессивных средах, с учетом геометрической нелинейности / Ю. М. Почтман, Б. Г. Алексеенко, Е. П. Куц // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1993. – №7 – 8. – С. 17 – 21.

58. Кольчик С. В. Оптимальное проектирование подкрепленных пластин с учетом неоднородности поля начальных скоростей коррозии по их областям / С. В. Кольчик // Методы решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела : сб. науч. тр. – Дн-ск : ДДУ, 1999. – №4. – С. 66 – 73.

59. Уразбахтин Ф. А. Особенности проектирования технических систем с заданным временем функционирования / Ф. А. Уразбахтин // Автоматизация решения задач прочности и оптимального проектирования конструкций. – К. – 1991. – С. 57 – 62.

60. Ратыч Л. В. Расчетно-экспериментальная методика определения долговечности элементов конструкций в коррозионной среде / Л. В. Ратыч, И. Н. Дмытрах // Малоцикловая усталость – механика разрушения, живучесть и материалоемкость конструкций : тез. докл. и сообщ. IV Всесоюз. симп. – М. : ИМАШ АН СССР, 1983. – Вып. 2. – С. 112–114.

61. Арутюнян Р. А. Вероятностная модель разрушения вследствие питтинговой коррозии / Р. А. Арутюнян // Проблемы прочности : сб. науч. трудов. – К. – 1989. – № 12. – С. 106–108.

62. Дзюба А. П. Алгоритм зміни конфігурації поперечного перерізу стрижневого елемента при складному згині в умовах корозійного зношування / А. П. Дзюба, О. О. Кузьміна // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. – Сер. : Механіка. – Дніпропетровськ. – 2000. – С. 20–29.

63. Дзюба А. П. Алгоритм оптимального проектування за кінцевим рівнем корозійного ураження конструкцій / А. П. Дзюба, О. Г. Василенко // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. – Сер. : Механіка. – Вып. 15, т. 1, №5. – 2011. – С. 78–90.

64. Зеленцов Д. Г. Обоснование выбора математических моделей, описывающих процесс коррозии под напряжением в металлических элементах конструкций / Д. Г. Зеленцов, Т. С. Казанцева // Вопр. химии и хим. технологии : сб. научн. трудов. – Днепропетровск. – 2003. – № 2. – С. 146–148.

65. Овчинников И. Г. Об одной модели разрушения пластинки в агрессивной среде / И. Г. Овчинников // Прикладная теория упругости : межвуз. сб. науч. трудов. – Саратов : СПИ, 1980. – Вып 3. – С. 50–55.

66. Филатов Г. В. К вопросу об оценке коэффициентов математических моделей коррозионного разрушения конструкций / Г. В. Филатов // Физико-химическая механика материалов : сб. науч. трудов. – Львов : изд-во Физико-механического ин-та, 1993. – Т. 29. – №6. – С. 59 – 64.

67. Филатов Г. В. Вычислительные особенности идентификации математической модели коррозионного разрушения при оптимальном проектировании конструкций / Г. В. Филатов // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : УГХТУ, 1999. – №2. – С. 54 – 56.

68. Филатов Г. В. Применение метода полиномиальной аппроксимации к идентификации математических моделей коррозионного разрушения при оптимальном проектировании конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / Г. В. Филатов // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : УГХТУ, 2001. – № 2. – С. 153 – 157.

69. Филатов Г. В. Об одной поисковой процедуре при идентификации математических моделей коррозионного разрушения конструкций / Г. В. Филатов. – К. : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова НС АН Украины, 1993. – С. 62 – 64.

70. Зеленцов Д. Г. Исследование влияния периметра на оптимальные параметры сечений корродирующих изгибаемых стержневых элементов / Д. Г. Зеленцов, Т. Ю. Ускова // Вопросы химии и хим. технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 2004. – №6. – С. 119 – 122.

71. Філатов Г. В. Оптимальне проектування конструкцій з обмеженою довговічністю / Г. В. Філатов // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : УГХТУ, 2004. – Вып. 6. – С. 123 – 128.

72. Солодка Н. О. Несуча здатність та оптимальне проектування балочних конструкцій з урахуванням впливу агресивних середовищ : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.17 / Солодка Наталя Олександрівна; Відкрите акціонер. т-во "Укр.н.-д. та проект. ін-т сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського". – К. : [б. и.], 2003. - 19 с. - Б. ц.

73. Дмитрах І. М. Вплив розтягуючих напружень на параметри корозійних процесів в модельних тріщинах-щілинах // Физ. -хим. механика материалов : зб. наук. праць. – Львів. – 1990. – №4. – С. 22–25.

74. Кольчик С. В. Долговечность плосконапряженных стальных пластин, подверженных целевой коррозии / С. В. Кольчик // Вісн. Дніпропетр. держ. ун-ту. – Сер. : Механіка. – 1998. – Вип. 1. – Т. 2.– С. 50 – 55.

75. Кольчик С. В. Оптимальное проектирование подкрепленных пластин с учетом неоднородности поля начальных скоростей коррозии по их областям / С. В. Кольчик // Методы решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела : сб. науч. тр. – Дн-ск : ДДУ, 1999. – №4. – С. 66 – 73.

76. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование изгибаемых элементов конструкций при комбинированном подходе к учету коррозии и защитных свойств покрытий / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман // Теоретические основы строительства // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Warsaw. – 2000. – N 8. – P. 518 – 521.

77. Филатов Г. В. Оптимизация параметров тонкостенной оболочки в условиях коррозионного разрушения / Г. В. Филатов // Теоретичні основи будівництва : зб. наук. праць // Theoretical Foundations of Civil Engineering. Warsaw. –1999. – N 7. – P. 179 – 183.

78. Филатов Г. В. Об одной поисковой процедуре при идентификации математических моделей коррозионного разрушения конструкций / Г. В. Филатов. – К. : Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова НС АН Украины, 1993. – С. 62 – 64.

79. Філатов Г. В. Оптимальне проектування конструкцій з обмеженою довговічністю / Г. В. Філатов // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : УГХТУ, 2004. – Вып. 6. – С. 123 – 128.

80. Зеленцов Д. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния и оптимальное проектирование балок-стенок, подверженных воздействию агрессивных сред / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Численные методы решения задач строительной механики, теории упругости и пластичности. – Волгоград. – 1990. – С. 154 – 155.

81. Криворучко Т. М. Оптимальное проектирование стержневых систем, подверженных коррозии, с учетом долговечности / Т. М. Криворучко // Работоспособность материалов и элементов конструкций при воздействии агрессивных сред. – Саратов : СПИ, 1986. – С. 41 – 42.

82. Почтман Ю. М. Долговечность скручиваемых стержней минимальной массы, находящихся в водородосодержащей среде / Ю. М. Почтман // ФХММ. – 1988. – №2. – С. 63 – 66.

83. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование изгибаемых элементов конструкций при комбинированном подходе к учету коррозии и защитных свойств покрытий / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман // Теоретические основы строительства // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Warsaw. – 2000. – N 8. – P. 518 – 521.

84. Зеленцов Д. Г. Оптимизация изгибаемой балки, подверженной коррозионному износу / Д. Г. Зеленцов // Современные проблемы прочности и оптимизации конструкций. – Днепропетровск : Наука и образование, 1997. – С. 39 – 44.

85. Криворучко Т. М. Оптимальное проектирование стержневых систем, подверженных коррозии, с учетом долговечности / Т. М. Криворучко // Работоспособность материалов и элементов конструкций при воздействии агрессивных сред. – Саратов : СПИ, 1986. – С. 41 – 42.

86. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование стержневых систем, подверженных коррозионному износу, на основе метода конечных элементов / Ю. М. Почтман, Б. Г. Алексеенко // Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций и машин : тр. II науч.-техн. конф. – Симферополь. – 1996. – С. 75 – 76.

87. Зеленцов Д. Г. Исследование влияния агрессивных сред на длительную устойчивость подкрепленных пластин / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Прикладная механика : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 1995. – №2. – С. 55 – 62.

88. Зеленцов Д. Г. Адаптированный алгоритм моделирования внешних нагрузок в задачах расчета долговечности корродирующих пластин [Электронный ресурс] / Д. Г. Зеленцов, Т. С. Науменко // SAIT 2010 : материалы 12-й междунар. науч.-техн. конф. – Электрон. данные. – К. : УНК “ИПСА” НТУУ “КПИ”, 2010. – С. 90. – Режим доступа: http://sait.org.ua/books/sait2010_ebook.pdf. – Назв. с титул. экрана.

88. Зеленцов Д. Г. Расчет конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы / Д. Г. Зеленцов. – Днепропетровск : УГХТУ, 2006. – 168 с.

89. Зеленцов Д. Г. Конечно-элементное моделирование процесса деформирования балок при наводороживании и коррозионном износе / Д. Г. Зеленцов, Н. А. Солодка, В. И. Касьяненко // Системные технологии : регион. міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ. – 3(38), 2005. – С. 38 – 45.

90. Зеленцов Д. Г. К вопросу о влиянии агрессивных сред на долговечность и напряженно-деформированное состояние тонкостенных конструкций / Д. Г. Зеленцов // Методы решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ. – 1989. – С. 51 – 54.

91. Кольчик С. В. Длительная несущая способность пластин с нестационарными параметрами, ослабленных малыми отверстиями / С. В. Кольчик // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : Навчальна книга, 1997. – Т. 1, – С. 59 – 63.

92. Почтман Ю. М. Оптимизация стоимости и долговечности стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами / Ю. М. Почтман, Б. Г. Алексеенко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1991. – №8. – С. 14 – 17.

93. Алексеенко Б. Г. Розрахунок та оптимальне проектування деяких стержньових систем, які функціонують в агресивному середовищі : автореф. дис. канд. техн. наук : 05. 23. 17 / Богдан Георгійович Алексеенко. – Дніпропетровськ : [б. в.], 2002. – 26 с.

94. Алексеенко Б. О применении метода конечных элементов в расчетах прочности и долговечности стержневых систем, взаимодействующих с агрессивными средами / Б. Алексеенко, Ю. Почтман // Теоретичні основи будівництва : зб. наук. праць // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Warsaw. – 1999. – N 7. – P. 11 – 15.

95. Зеленцов Д. Г. Напряженно-деформированное состояние стержневых конструкций с нестационарными геометрическими характеристиками / Д. Г. Зеленцов, С. В. Кольчик // Методы решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела : сб. научн. трудов. – Днепропетровск : изд-во ДГУ, 1997. –С. 37–42.

96. Зеленцов Д. Г. Конечно-элементный расчет балочных конструкций при коррозионном износе с использованием элементов переменной жесткости / Д. Г. Зеленцов, Н. А. Солодкая // Наук. вісн. НГУ : наук.-техн. журнал. – Дніпропетровськ : НГУ. – 2004. –№12. – С. 23 – 26.

97. Зеленцов Д. Г. Исследование долговечности нагруженных балок двутаврового сечения, подверженных коррозионному износу / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Строительство. Материаловедение. Машиностроение : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ПГАСА, 1999, вып. 9. – Ч. 1. – 29–35.

98. Зеленцов Д. Г. Весовая оптимизация статически неопределимой балки при коррозионном износе с использованием конечных элементов переменной жесткости / Д. Г. Зеленцов, Н. А. Солодкая // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. праць.– Дніпропетровськ. – 2002. –Вип. 4(21). – С. 28 – 32.

99. Зеленцов Д. Г. Решение задачи долговечности нагруженной балки при коррозионном износе с учетом изменения формы сечения / Д. Г. Зеленцов // Системні технології. Системні технології в задачах моделювання технічних систем : зб. наук. праць.– Дніпропетровськ. – 1999. –Вип. 8. – С. 36 – 42.

100. Долинский В. М. Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии / В. М. Долинский // Исследования по теории пластин и оболочек : сб. науч. трудов. – Казань : изд-во Казанского ун-та, 1976. – Вып. 7. – С. 37 – 42.

101. Зеленцов Д. Г. Исследование зависимости долговечности прямоугольной пластины с подкрепляющим набором от площади конструкции, контактирующей с агрессивной средой / Д. Г. Зеленцов, В. И. Касьяненко // Вопросы химии и химической технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 2004. – №6. – С. 115 – 118.

102. Зеленцов Д. Г. К вопросу о влиянии агрессивных сред на долговечность и напряженно-деформированное состояние тонкостенных конструкций / Д. Г. Зеленцов // Методы решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела : зб. наук. праць. – Дніпропетровськ. – 1989. – С. 51 – 54.

103. Зеленцов Д. Г. Долговечность балки, подверженной коррозионному износу, при ограничениях жесткости / Д. Г. Зеленцов, Н. А. Солодкая // Науковий вісник НГА України. – 2002. – №2. – С. 45 – 47.

104. Зеленцов Д. Г. Исследование влияния агрессивных сред на длительную устойчивость подкрепленных пластин / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Прикладная механика : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 1995. – №2. – С. 55 – 62.

105. Цикерман Л. Я. Долгосрочный прогноз опасности грунтовой коррозии металлов / Л. Я. Цикерман. – М. : Недра, 1977. – 228 с.

106. Зеленцов Д. Г. Исследование влияния периметра на оптимальные параметры сечений корродирующих изгибаемых стержневых элементов / Д. Г. Зеленцов, Т. Ю. Ус-

кова // Вопросы химии и хим. технологии : сб. науч. трудов. – Днепропетровск. – 2004. – №6. – С. 119 – 122.

107. Колесник И. А. Об определении рациональной формы статически неопределимых стержневых конструкций с учетом воздействия агрессивных сред / И. А. Колесник, Д. Г. Зеленцов, Ю. А. Храпач // Теоретичні основи будівництва : зб. наук. праць // Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Warsaw. – 2001. – N 9. – P. 89 – 94.

108. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование стержневых систем, подверженных коррозионному износу, на основе метода конечных элементов / Ю. М. Почтман, Б. Г. Алексеенко // Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций и машин : тр. II науч.-техн. конф. – Симферополь. – 1996. – С. 75 – 76.

109. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций / В. Л. Бидерман. – М. : Машиностроение, 1977. – 488 с.

110. Гудрамович В. С. Несущая способность и долговечность элементов конструкций / В. С. Гудрамович, Е. С. Переверзев. – К. : Наук. думка, 1981. – 284 с.

111. Гудрамович В. С. Контактные взаимодействия и оптимизация оболочечных конструкций при локальном нагружении / В. С. Гудрамович, А. П. Дзюба // Математичні методи та фізико-математичні поля. – Львів. – 2008. – Т. 51. – № 2. – С. 188 – 201.

112. Дзюба А. П. Оптимизация формы круглых пластин и оболочек вращения / А. П. Дзюба, Л. Д. Левитина. – Днепропетровск : изд-во ДГУ, 1985. – 124 с.

113. Долинский В. М. Изгиб тонких пластин, подверженных коррозионному износу / В. М. Долинский // Динамика и прочность машин. – Харьков. – 1975. – Вып. 21. – С. 43 – 49.

114. Зеленцов Д. Г. О влиянии химически активных сред на напряженно-деформированное состояние и долговечность тонкостенных конструкций / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Изв. акад. арм. ССР. Механика. – 1990. – №5. – С. 38–43.

115. Карпунин В. Г. Исследование изгиба и устойчивости пластин и оболочек с учетом сплошной коррозии : дис. ... канд. техн. наук : 05. 23. 17 / В. Г. Карпунин, Свердловск. – 1977. – 186 с.

116. Криворучко Т. М. Долговечность и оптимальное проектирование тонкостенных конструкций, контактирующих с химически активными средами / Т. М. Криворучко // Методы решения прикладных задач механики деформируемого твердого тела : сб. науч. трудов. – Днепропетровск : ДГУ, 1989. – С. 74 – 76.

117. Криворучко Т. М. Оптимальное проектирование подкрепленных цилиндрических оболочек с учетом коррозионного износа / Т. М. Криворучко, Ю. М. Почтман // Журн. прикл. механики и техн. физики. – 1989. – № 3. – С. 124–128.

118. Почтман Ю. М. Векторная и скалярная оптимизация подкрепленных цилиндрических оболочек, подверженных стохастическому комбинированному нагружению / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман // Математические методы и физико-механические поля. – К. : Наук. думка, 1991. – Вып. 34. – С. 65–69.

119. Почтман Ю. М. Об одном подходе к оптимальному проектированию подкрепленных оболочек по критерию надежности / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман // Математические методы и физико-механические поля. – К. : Наук. думка, 1991. – Вып. 36. – С. 60–63.

120. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование цилиндрических резервуаров с учетом равнонадежности корродирующей обшивки / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман // Проблемы прочности. – 1995, № 7. – С. 90–94.

121. Hudramovich V. S. Contact interaction and optimization of locally loaded shell structures / V. S. Hudramovich, A. P. Dzjuba // Journal of Mathematical Science – Springer Science + Business media. – 2009. – Vol. 162. – N 2. – P. 231 – 245.

122. Почтман Ю.М., Макуха Н.В., Фридман В.В. Оптимальное проектирование цилиндрических резервуаров, эксплуатируемых в агрессивных средах, по критерию полезности. // Изв. вузов. Строительство. 1994. №5-6. - С. 9-13.

123. Заев В.А., Никитенко А.Ф. Расчет и проектирование оптимальных по долговечности элементов конструкций. // ПМТФ. 1987. №3. - С. 165-171.

Данная работа выполнена в рамках работы над грантом РФФИ № 12-01-31130 Мол_а «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями».