

Министерство образования и науки Украины  
Государственное высшее учебное заведение  
«Украинский государственный химико-технологический университет»

На правах рукописи

**Денисюк Ольга Ростиславовна**

УДК 004.942:519.853

**Модели и методы управляемого по точности численного  
анализа корродирующих шарнирно-стержневых конструкций**

01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы

Диссертация на соискание учёной степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель  
Зеленцов Дмитрий Гегемонович,  
доктор технических наук,  
профессор

Днепр – 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ  | 5  |
| ВВЕДЕНИЕ   | 6  |
| ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ                        | 14 |
| 1.1 Математические модели накопления геометрических повреждений  | 15 |
| 1.2 Математические модели корродирующих сечений элементов шарнирно-стержневых конструкций  | 21 |
| 1.3 Проблемы оптимального проектирования конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах   | 24 |
| 1.3.1 Вычислительные методы в задачах оптимального проектирования корродирующих конструкций  | 25 |
| 1.3.2 Вычислительные проблемы, связанные с дискретной постановкой задачи оптимизации   | 28 |
| 1.3.3 Численные методы решения систем дифференциальных уравнений   | 30 |
| 1.3.4 Обеспечение заданной точности решения систем дифференциальных уравнений  | 34 |
| Выводы по главе 1  | 35 |
| ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ АСПЕКТОВ ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ | 37 |
| 2.1 Обобщенная математическая постановка задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций                                    | 37 |
| 2.2 Анализ проблемных аспектов задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций  | 43 |
| 2.2.1 Проблемы, обусловленные влиянием напряжений на скорость коррозионного деформирования   | 43 |
| 2.2.2 Проблемы, вызываемые сложностью контроля   |    |

|   |           |
|---|-----------|
|   | 3         |
| погрешности вычисления функций ограничений  | 47        |
| 2.2.3 Проблемы, обусловленные дискретной постановкой задачи оптимизации   | 49        |
| 2.3 Концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих шарнирно-стержневых конструкций                      | 52        |
| Выводы по главе 2   | 54        |
| <b>ГЛАВА 3 УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ КОРРОЗИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ</b>   | <b>56</b> |
| 3.1 Проблемные аспекты существующих моделей корродирующих сечений   | 58        |
| 3.2 Описание уточнённой модели корродирующих сечений  | 62        |
| 3.3 Задача идентификации параметров моделей корродирующих сечений   | 68        |
| 3.4 Усовершенствованная модель коррозионного деформирования шарнирно-стержневых конструкций                                     | 75        |
| Выводы по главе 3   | 77        |
| <b>ГЛАВА 4 УПРАВЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЬЮ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ФУНКЦИЙ ОГРАНИЧЕНИЙ</b>             | <b>78</b> |
| 4.1 Постановка задачи управления погрешностью решения систем дифференциальных уравнений   | 78        |
| 4.2 Концепция построения аппроксимирующей функции   | 83        |
| 4.3 Обоснование архитектуры нейронной сети  | 85        |
| 4.4 Алгоритм получения учебных образцов и обучение искусственной нейронной сети   | 93        |
| 4.5 Анализ результатов численного решения системы дифференциальных уравнений с использованием алгоритма управления погрешностью | 96        |
| Выводы по главе 4   | 99        |

|  |     |
|--|-----|
| ГЛАВА 5 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ   | 100 |
| 5.1 Обоснование использование метода скользящего допуска к решению задач оптимального проектирования корродирующих конструкций | 100 |
| 5.2 Использование генетического алгоритма для решения оптимизационной задачи   | 105 |
| 5.3 Численные иллюстрации решения оптимизационных задач  | 108 |
| 5.3.1 Оптимальное проектирование пятистержневой фермы  | 108 |
| 5.3.2 Оптимальное проектирование пятнадцатистержневой фермы  | 111 |
| 5.3.3 Оптимальное проектирование 47-стержневой фермы   | 113 |
| Выводы по главе 5  | 116 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ   | 117 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ   | 120 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения   | 136 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт про використання в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи Денисюк О. Р.                         | 137 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Довідка   | 138 |

**ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

- АС – агрессивная среда;
- ВП – варьируемый параметр;
- ГА – генетический алгоритм;
- ИНС – искусственная нейронная сеть;
- КК – корродирующая конструкция;
- КСД – критерий скользящего допуска;
- МКЭ – метод конечных элементов;
- МСД – метод скользящего допуска;
- НДС – напряжённно-деформированное состояние;
- НЛП – нелинейное математическое программирование;
- СДУ – система дифференциальных уравнений;
- ФО – функция ограничений.

## ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях промышленности, в частности, в химической, нефтеперерабатывающей и металлургической, технологические процессы требуют использования рабочих сред, агрессивных по отношению к конструкционным материалам. Последствием влияния таких сред на элементы конструкции является коррозионный износ, то есть разрушение поверхностных слоев металла. Коррозия приводит к ухудшению рабочих характеристик металлоконструкций: уменьшению геометрических размеров их элементов и, соответственно, снижению несущей способности конструкции. Игнорирование влияния агрессивной среды (АС) на этапе проектирования может привести к преждевременному выходу конструкций из строя и связанному с этим ущербу, как экономическому, так, в ряде случаев, и экологическому.

Анализ литературных источников показал, что в большинстве существующих работ оптимизация корродирующих шарнирно-стержневых конструкций (ШСК) осуществлялась на непрерывном множестве варьируемых параметров, что существенно усложняло их непосредственное применение в технике. Реальность состоит в том, что ШСК изготавливаются из прокатных профилей, размеры сечений которых регламентируются стандартами. Исходя из этого, на самом деле варьируемыми параметрами должны являться не размеры сечений элементов ШСК, а типы и типоразмеры профилей. Для успешного решения оптимизационной задачи в этом случае необходимо наличие уточненной модели процесса коррозионного деформирования ШСК и новых методов управляемого по точности численного анализа их поведения.

Хотя оптимизация на основе дискретных математических моделей в ситуациях, когда она не сводится к «почти эквивалентной» непрерывной оптимизации, обычно более сложна для разработки робастных вычислительных методов, современные примеры из других областей

демонстрируют перспективность ее практической реализации с использованием методов эволюционного моделирования, в частности, генетических алгоритмов. Ведущую роль играет точность решения задачи, под которой в данном случае имеется в виду точность вычисления функций ограничений (ФО). Для того, чтобы учесть этот аспект, новым и перспективным является включение в моделирующий комплекс нейросетевого модуля управления погрешностью, использование которого для регулирования точности вычислений в сочетании с методом скользящего допуска позволяет существенно повысить эффективность алгоритма.

**Актуальность темы.** Проблема коррозии металлических конструкций имеет первоочередное значение для промышленности. В промышленности и народном хозяйстве Украины эксплуатируется более 34,5 тонн металлоконструкций [112]. Немалую их часть составляют объекты, используемые в металлургической, химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Элементы таких конструкций функционируют в сильноагрессивных средах (скорость коррозии более 0,5 мм/год). Примерами могут быть элементы ректификационных установок, работающие в атмосфере перегретого (360–420°C), насыщенного окислами кислотообразующих элементов пара, или объекты, используемые в металлургической промышленности на агрегатах периодического действия в контакте с травильными растворами температурой 65–75°C с концентрацией серной кислоты 6–12%. Преждевременный выход из строя подобных конструкций может вызвать остановку технологического процесса, приводя к значительному материальному ущербу.

Наряду со стоимостью разрушенного металла и ущербом от преждевременного выхода конструкций из строя, к основным видам потерь от коррозии относится ущерб, вызванный нерациональными конструкторскими решениями. Чтобы избежать их, необходимы надежные, точные и эффективные методики проектирования конструкций, предназначенных для эксплуатации в агрессивной среде.

Представляется актуальной проблема разработки моделей и метода управляемого по точности численного анализа корродирующих шарнирно-стержневых конструкций для повышения качества и достоверности конструкторских решений при их проектировании.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Диссертационная работа выполнена в государственном высшем учебном заведении «Украинский государственный химико-технологический университет» в соответствии с тематикой научно-исследовательской работы кафедры информационных систем – госбюджетная тема: «Интеллектуальные информационные системы моделирования, анализа и актуального проектирования сложных систем (№ 0114U002803).

При выполнении перечисленных работ автором было проведено обоснование математического формулирования новой задачи дискретной оптимизации шарнирно-стержневых конструкций с учетом происходящих в них физико-химических процессов, предполагающей получение результата с заданной точностью; получены новые модели корродирующих сечений; разработан нейросетевой алгоритм для обеспечения необходимой точности решения системы дифференциальных уравнений, моделирующих процесс коррозионного износа в элементах конструкций; создана информационная система, предназначенная для реализации концептуальной модели определения оптимальных параметров корродирующих конструкций.

**Цель работы** состоит в повышении качества и достоверности конструкторских решений при проектировании корродирующих ШСК за счет обеспечения точности вычисления сложных функций ограничений при приемлемых вычислительных затратах.

**Достижение поставленной цели** предполагает решение следующих основных задач:

1. Проведение анализа предметной области с целью определения проблемных аспектов при моделировании процесса коррозионного деформирования ШСК, в частности, проблем точности численного анализа.



2. Разработка концептуальной модели решения задач определения оптимальных параметров шарнирно-стержневых конструкций по критерию материалоемкости с учетом происходящих в них физико-химических процессов.

3. Усовершенствование модели коррозионного деформирования ШСК путем разработки новых моделей корродирующих сечений.

4. Разработка нового метода управления погрешностью вычисления функций ограничений на основе искусственных нейронных сетей.

5. Разработка метода решения задач дискретной оптимизации корродирующих ШСК с ограничениями с использованием генетических алгоритмов и метода скользящего допуска.

6. Внедрение научных результатов диссертационной работы.

*Объект исследования:* процесс коррозионного деформирования ШСК в агрессивных средах, порождающий риск разрушения этих конструкций до истечения требуемого срока эксплуатации.

*Предмет исследования:* математические модели процесса коррозионного деформирования и созданные на их основе вычислительные методы управляемого по точности анализа поведения ШСК и снижения их материалоемкости.

*Методы исследования:* для решения поставленных задач применялись математические методы анализа процессов. Для решения задач оптимизации применялись метод штрафных функций, генетический алгоритм, метод скользящего допуска. Для управления погрешностью вычисления функций ограничений использовались искусственные нейронные сети (ИНС). Вычисление запаса несущей способности выполнено с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

**Научная новизна полученных результатов** состоит в следующем:

1. Впервые разработана концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих шарнирно-стержневых конструкций, которая отличается от существующих тем, что поиск

оптимального проекта осуществляется на дискретном множестве решений, используется усовершенствованная модель процесса коррозионного деформирования и новая модель управления погрешностью вычисления функции ограничений оптимизационной задачи. Данная модель является основой для построения метода управляемого по точности численного анализа корродирующих ШСК.

2. Впервые разработан метод управления погрешностью вычисления ФО оптимизационной задачи с использованием искусственных нейронных сетей, что впервые позволило определить параметры вычислительных процедур в процессе решения задачи на основании информации о необходимой точности и параметрах исследуемого объекта.

3. Впервые разработан метод решения оптимизационной задачи на основе генетических алгоритмов и метода скользящего допуска для реализации новой концептуальной модели, который, в отличие от существующих, позволяет изменять в процессе решения задачи погрешность вычисления ФО, что уменьшает вычислительные затраты при одновременном обеспечении заданной точности.

4. Усовершенствована модель коррозионного деформирования ШСК путем создания новых моделей корродирующих сечений стержневых элементов, что впервые позволило исследовать процесс изменения напряжений в элементах реальных конструкций.

**Достоверность основных положений и результатов** подтверждается обоснованностью и строгостью формулировок математических задач, сравнением полученных расчётов с аналитическими и численными результатами других авторов, а также экспертными оценками специалистов, полученными при обсуждении диссертации на научных семинарах и конференциях.

**Практическое значение полученных результатов.** Все основные научные результаты были внедрены при моделировании коррозионного

деформирования и определении оптимальных параметров шарнирно-стержневых конструкций, эксплуатирующихся в условиях агрессивных сред.

В ООО «Днепровская холдинговая компания» использование усовершенствованной модели коррозионного деформирования позволило при проведении экспертных оценок остаточной несущей способности и разработке новых конструкторских проектов металлоконструкций промышленных зданий с учетом влияния агрессивных сред уточнить прогнозные оценки запаса несущей способности металлоконструкций, обоснованно определить срок и содержание ремонтно-монтажных работ. При разработке новых конструкторских проектов использование оптимизационного алгоритма дало возможность обоснованно назначить параметры металлоконструкций на основании критериев материалоемкости и долговечности (акт внедрения от 01.09.2016).

Разработанная автором усовершенствованная математическая модель коррозионного деформирования и алгоритм метода скользящего допуска нашли использование на кафедре информационных систем ГВУЗ УГХТУ при выполнении научно-исследовательской работы «Интеллектуальные информационные системы моделирования, анализа и оптимального проектирования сложных систем» (№0114U002803, справка от 16.05.2016).

Результаты исследований были использованы в учебном процессе ГВУЗ УГХТУ при преподавании дисциплин «Математическое моделирование химико-технологических процессов», «Методы эволюционного моделирования», «Нейронные сети», «Методы исследования операций», а также при выполнении дипломных работ магистров (акт от 06.06.2016).

**Личный вклад соискателя.** Все основные положения и результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. В работах без соавторов [16, 17] автором предложен метод управления погрешностью систем дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозии в элементах металлических конструкций, с использованием искусственных

нейронных сетей. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат следующие результаты. В [39, 76] разработаны новые модели корродирующих сечений стержневых элементов. В [18, 25, 26, 30] предложена математическая формулировка новой задачи дискретной оптимизации ШСК с учетом физико-математических процессов в них, которая предусматривает получение результата с заданной точностью, а также использование метода скользящего допуска для решения данной задачи. В [37, 124] предлагается использование метода управления погрешностью вычисления функции ограничений с помощью искусственных нейронных сетей при решении задач оптимального проектирования корродирующих ШСК. В [19] предложены способы повышения точности решения систем дифференциальных уравнений, описывающих коррозионный процесс.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на научных семинарах, международных и всеукраинских научно-технических конференциях: Международной научно-технической конференции «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні ІТММ-2015» (Днепропетровск, 2015), I Всеукраинской научно-технической конференции «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем КМОСС-2015» (Днепропетровск, 2015), VII Всеукраинской научно-практической конференции с международным участием «Інформатика та системні науки ІСН-2016» (Полтава, 2016), Международной научно-технической конференции «Геоінформаційні системи, комп'ютерні технології еколого-економічного моніторингу, ГІСКТЕЕМ-2016» (Днепропетровск, 2016). В полном объеме диссертационная работа была представлена на: IV Международной научно-технической конференции «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (Харьков, ХНУ им. В.Н. Каразина, 2016), межвузовском научном семинаре «Математическое моделирование и оптимизация сложных систем» (Днепр, ДВУЗ УГХТУ, 2016).

**Публикации.** Основные результаты исследований, выполненных в диссертации, опубликованы в 11 работах, среди которых 4 статьи опубликовано в специализированных изданиях, внесённых в перечень ВАК Украины, одна статья опубликована в зарубежном издании, 2 статьи в изданиях, входящих в наукометрические базы «Index Copernicus», «РИНЦ», 6 публикаций в сборниках материалов конференции.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка использованных источников и трех приложений. Общий объем работы составляет 138 страниц, из них: 23 таблицы, 32 рисунка, 114 страниц основного текста, 124 наименования списка литературы на 15 страницах и три приложения на трех страницах.

# ГЛАВА 1

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПО ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Механические системы, подвергающиеся дестабилизирующему воздействию агрессивных сред, широко используются в различных отраслях промышленности. Воздействие агрессивных сред является причиной возникновения коррозионного износа, то есть разрушения поверхностных слоев металла, приводящего к уменьшению геометрических размеров конструктивных элементов, уменьшению их несущей способности и, в конечном итоге, к преждевременному, зачастую аварийному выходу механической системы из строя.

Для исследования поведения конструкции в агрессивной среде необходимо построение соответствующей математической модели, которая, в общем случае, включает в себя следующие частные модели:

- модель расчётной схемы (стержень, стержневая система, пластина, оболочка, трёхмерное тело, гибридная система);
- модель граничных условий (задание конкретных точек или областей объекта, на которые налагаются связи, соответствующие реальным условиям его работы);
- модель нагружения (задание точек или областей, к которым прилагаются нагрузки);
- модель материала, характеризующая его свойства (хрупкие, упругие, пластические и т.п.);
- модель предельного состояния (задание условий, нарушение которых приводит к разрушению объекта);
- модель коррозионного взаимодействия (накопления геометрических повреждений);

– модель корродирующей поверхности (для стержневых конструкций – корродирующего сечения).

В настоящем обзоре рассматриваются работы, посвящённые современному состоянию исследований в области моделирования поведения и оптимального проектирования конструкций, подверженных влиянию агрессивных сред. Как и в диссертационной работе в целом, в обзоре рассматриваются процессы коррозии только в элементах металлических конструкций.

### **1.1 Математические модели накопления геометрических повреждений**

В диссертационной работе рассматривается случай общей (сплошной) электрохимической коррозии металлов. Такая коррозия возникает при контакте металла с окружающей электролитически проводящей средой и предполагает достаточно равномерное растворение или разрыхление его поверхности в агрессивной среде [6, 15], и является наиболее распространенной. Среди таких авторов, внесших значительный вклад в исследование сплошной коррозии, следует отметить Э. М. Гутмана, В. М. Долинского, В. Г. Карпунина, И. Г. Овчинникова, В. В. Петрова, В. Д. Райзера, R. L. Dillon, A. G. Liddard и других [11, 14, 15, 20–22, 58, 59, 77–80, 87, 88, 98, 118, 120].

Металлические конструкции, эксплуатирующиеся в условиях агрессивных сред, можно рассматривать как сложные механические системы: при добавлении в систему нового элемента (воздействия агрессивной среды), возникают качественно новые свойства, при вычленении же компонентов системы принципиальные свойства могут быть потеряны [35].

Существуют два подхода к моделированию процесса коррозионного деформирования: физический и математический. Физическое моделирование подразумевает построение физической модели, максимально приближенной

по своей природе к исследуемому процессу. Элементы конструкций в естественных или имитирующих их условиях исследуются на протяжении достаточно большого периода времени для накопления информации о процессе коррозионного деформирования. К недостаткам этого подхода относится строгая индивидуальная принадлежность моделей, а также недостаточная точность методик переноса результатов, полученных для моделей, на реальные конструкции.

Математическое моделирование предполагает установление соответствия реальной системы некоторой математической модели и исследование этой модели, позволяющее получить характеристики реальной системы [8, 82, 89, 103]. Применительно к процессу коррозионного деформирования математическое описание заключается в формализации процесса изменения во времени некоторых параметров, характеризующих степень коррозионного поражения конструкции. В качестве такого параметра рассматривается глубина коррозионного поражения – толщина полностью разрушенного поверхностного слоя, либо слоя, свойства которого вследствие коррозии отличаются от свойств основного металла.

Как отмечается в работах [80, 88], многочисленные математические модели коррозионного износа, существующие на сегодняшний день, можно разделить на два принципиально различных класса: модели, описывающие физико-химический процесс коррозии на причинном уровне, и феноменологические модели, не объясняющие глубинных причин явления, а дающие описание кинетики изменения параметров состояния в виде функциональной эмпирической зависимости этих параметров от времени. Модели второго класса более распространены.

Некоторые математические модели, описывающие процесс коррозионного разрушения металла без учета влияния напряжений на скорость коррозионного износа, были предложены Л.Я. Цикерманом, А. Лиддаром, А.Ф. Малыгиным, А.В. Гуцем, Ю.В. Янковским, Е.Е. Ющенковым, В.И. Никитиным, И.Г. Овчинниковым (табл. 1.1) [35].



**Модели коррозионного износа, не учитывающие влияние напряжений**

| Вид модели                                   | Источник | Номер формулы |
|--|----------|---------------|
| $\delta = k[1 - \exp(\alpha t)]$             | [110]    | (1.1)         |
| $\delta = k \lg(\alpha + t)$                 | [120]    | (1.2)         |
| $\delta = \frac{b t}{t + R}$                 | [110]    | (1.3)         |
| $\frac{d\delta}{dt} = k\delta$               | [69]     | (1.4)         |
| $\frac{d\delta}{dt} = \alpha \exp(-\beta t)$ | [75]     | (1.5)         |
| $\frac{d\delta}{dt} = k\delta(b - \delta)$   | [77]     | (1.6)         |

В приведенных формулах:  $t$  – время;  $k$ ,  $b$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $R$  – коэффициенты, отражающие влияние среды на процесс коррозии.

Для таких моделей оценка состояния объекта сводится к серии последовательных расчётов для разных значений параметра глубины коррозионного поражения, соответствующего различным моментам времени. Глубина коррозионного поражения однозначно определяет геометрические размеры элемента. Данные модели просты в использовании, однако, тот факт, что влияние напряженно-деформированного состояния конструкции на скорость протекания процесса коррозии в ее элементах не учитывается, является их существенным недостатком. Зачастую это влияние весьма значительно, что нашло отражение в математических моделях, описывающих коррозионный процесс с учётом влияния механических напряжений.

На основании опытов, проведенных В.О. Кренигом, Г.В. Акимов вывел приближенную зависимость скорости коррозии от растягивающего напряжения  $\sigma$ , которая оказалась близкой к линейной [1].

В.М. Долинским была предложена модель, являющаяся обобщением линейной зависимости скорости коррозии от растягивающего напряжения для случая сложного напряженного состояния [21]. Модель В.М. Долинского получила развитие в работах М.С. Корнишина и В.Г. Карпунина [59].

В работе Э.М. Гутмана была представлена математическая модель, в которой для описания зависимости между скоростью коррозии и глубиной коррозионного деформирования использовалась экспоненциальная функция, а также учитывалось влияние на скорость коррозии мольного объема корродирующего металла и температуры протекания процесса [15]. Схожие модели с некоторыми уточнениями использовались, например, И. Г. Овчинниковым и В. В. Петровым [88] и Г. П. Мельниковым [70].

Новые модели коррозионного деформирования были представлены в работах И.Г. Овчинникова и В.В. Петрова с сотрудниками [87]. В разработанных ими моделях, очевидно, впервые было учтено влияние на скорость коррозии не только напряженного, но также и деформированного состояния элемента конструкции.

Рядом исследователей, в частности, И.Г. Овчинниковым и В.В. Петровым [88], был проведен анализ достоверности моделей коррозионного износа, основанный на сопоставлении экспериментальных данных с результатами расчета по рассматриваемым моделям, и сделаны выводы о предпочтительности конкретных моделей.

Для анализа процессов коррозионного деформирования при неполной информации о параметрах агрессивной среды возможно использование вероятностных моделей. Р.А. Арутюнян [3], В.Я. Флакс [105] использовали вероятностный подход для оценки коррозионной стойкости металлов, склонных к питтингу. Тонкий слой окислов, образующихся на поверхности металлов, способствует развитию питтинговой коррозии. Р.А. Арутюнян [3] предположил случайный характер начального распределения питтингов на поверхности тонкостенного конструкционного элемента и времени появления первого отверстия. В.Я. Флаксом [105] на основании анализа

результатов проведенных исследований атмосферной коррозии в качестве обобщённого показателя сопротивляемости металлов сплошной коррозии была принята вероятность отсутствия сквозной коррозии на металлической поверхности заданной площади после определенного срока службы.

Некоторые из моделей коррозионного деформирования, учитывающие влияние напряжений, представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

**Модели коррозионного износа, учитывающие влияние напряжений**

| Вид модели  | Источник | Номер формулы |
|---|----------|---------------|
| $\frac{d\delta}{dt} = v_0 \cdot (1 + k\sigma)$                          | [21]     | (1.7)         |
| $\frac{d\delta}{dt} = v_0 + m \sigma_{eq}$                              | [21]     | (1.8)         |
| $\frac{d\delta}{dt} = \alpha \Psi(t) \times (1 + k\sigma)$              | [58]     | (1.9)         |
| $\frac{d\delta}{dt} = v_0 \exp \frac{V\sigma}{RT}$ ,                    | [15]     | (1.10)        |
| $\frac{d\delta}{dt} = v_0 (1 + k\varepsilon) \exp \frac{V\sigma}{RT}$ . | [14]     | (1.11)        |
| $\frac{d\delta}{dt} = v_0 + \alpha\varepsilon(\sigma - \sigma^*)$       | [20]     | (1.12)        |
| $\frac{d\delta}{dt} = v_0 (1 + k\varepsilon)$                           | [88]     | (1.13)        |

В приведенных в таблице формулах:  $v_0$  – скорость коррозии при отсутствии напряжений;  $k$  – коэффициент влияния напряжённого состояния на скорость коррозии,  $\sigma_{eq}$  – некоторое эквивалентное напряжение, при котором коррозия при сложном напряжённом состоянии протекает с той же скоростью, что и при простом;  $t$  – время;  $T$  – температура;  $R$  – газовая постоянная;  $V$  – мольный объём материала корродирующего элемента;  $\varepsilon$  – удельная энергии деформирования.

Необходимо отметить, что не существует простого и однозначного

критерия выбора одной из многих существующих моделей. В то же время большое количество существующих моделей делает проблематичным построение единого подхода к решению поставленной задачи.

На основании вышеизложенного, автор считает целесообразным ограничить число рассматриваемых в диссертации моделей коррозионного износа. В монографии [35], показано, что феноменологически подобные модели (1.7) – (1.13), могут быть сведены к одной или двум.

Пусть  $\sigma_{eq}$  - эквивалентное напряжение, выбранное так, чтобы процесс коррозии в условиях сложного напряжения протекал так же, как и при одноосевом растяжении или сжатии. Тогда модели (1.7) – (1.13) могут быть записаны как:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \Psi\{\sigma_{eq}(\delta)\}, \quad (1.14)$$

где  $\Psi\{\sigma_{eq}(\delta)\}$  - некая функция от эквивалентного напряжения.

Разложив функцию  $\Psi\{\sigma_{eq}(\delta)\}$  в ряд по степеням  $\sigma_{eq}$ , получим:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 [1 + k_1 \sigma_{eq} + k_2 \sigma_{eq}^2 + \dots + k_n \sigma_{eq}^n], \quad (1.15)$$

где  $k_1 \dots k_n$  - коэффициенты, учитывающие влияние напряжения на скорость коррозии.

Пренебрегая слагаемыми, содержащими  $\sigma_{eq}$  в степенях выше первой, приходим к модели вида:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 [1 + k \sigma_{eq}], \quad (1.16)$$

аналогичному модели (1.7), предложенной В.М. Долинским [21]. Таким образом, основная часть известных моделей коррозионного износа может быть представлена в виде (1.7). Численные эксперименты показывают, что линейная аппроксимация дает удовлетворительные результаты для приведенных в таблице 1.1 моделей, и результаты, полученные для модели (1.7), будут справедливы и для остальных из них. Достаточно высокую

достоверность данной модели подтверждает и анализ И.Г. Овчинникова и В.В. Петрова [88].

После выбора модели коррозионного деформирования вида (1.16) возникает проблема определения значений коэффициента  $k$ , обеспечивающего максимальное приближение модели к известным экспериментальным данным. Способы решения данной проблемы приведены в [35]. В большинстве известных работ коэффициент  $k$  считается постоянной величиной и не зависит от начальных параметров конструкции.

В результате существенного влияния механических напряжений в конструкции на скорость протекания процесса коррозии в ее элементах при значительно неоднородном начальном напряжённом состоянии системы количество параметров, определяющих в произвольный момент времени геометрические размеры конструкции, существенно возрастает. Это вызывает перераспределение внутренних усилий в элементах системы, что во многом определяет характер её разрушения.

## **1.2 Математические модели корродирующих сечений элементов шарнирно-стержневых конструкций**

Задача создания моделей сечений стержневых элементов не была актуальной при решении классических задач строительной механики. Для нахождения площади, периметра, момента инерции и других геометрические характеристик элементов, необходимых для проведения расчетов, можно было использовать данные из справочной литературы.

В рамках задач механики корродирующих конструкций как отдельного направления возникает необходимость описания процесса изменения во времени геометрических характеристик сечения. Изменение во времени параметров сечения стержня зависит как от параметров агрессивной среды, так и от параметров и напряженно-деформированного состояния самой корродирующей конструкции. Благодаря этому приобрела и до сих пор

сохраняет актуальность проблема создания математических моделей корродирующих сечений стержневых элементов.

Данная проблема практически не нашла отражения в известной литературе. Это связано с тем, что в большинстве известных работ раннего периода развития механики корродирующих конструкций в качестве объектов исследований рассматривались абстрактные конструкционные элементы, например, стержни круглого или кольцевого сечений. Так, ШСК, состоящие из стержней кольцевого сечения рассматривались, например, в [28, 64], балочные и рамные конструкции с прямоугольным сечением – в [34, 53, 55]. Реальные конструкции, элементы которых изготавливаются из стандартных прокатных профилей (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголок) в качестве объекта в данных работах не рассматривались, что ограничивало их практическую применимость.

Однако необходимость моделей корродирующих сечений все равно возникала для балочных и рамных конструкций, в которых неоднородность поля напряжений по области сечения вызывает изменение не только размеров сечения, но и его формы [55]. Так, к примеру, в монографии [35] предлагалось решение задачи изгиба балки с учётом воздействия агрессивной среды. Изменение формы поперечного сечения балки учитывалось путем его аппроксимации набором полосок. Это позволяло моделировать процесс накопления повреждений в сечении путем изменения длин всех полосок и толщин верхней и нижней (рис 1.1).

Другой возможный подход к построению модели сечения стержня предполагает аппроксимацию криволинейного контура ломаной линией. Геометрические характеристики сечения в произвольный момент времени определяются согласно алгоритму, приведённому в [73]. Координаты точек меняются во времени по мере протекания процесса коррозии (рис. 1.2).

Как первый подход, предполагающий решение системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение размеров и формы сечения, так и второй, требующий переопределения координат контура

сечения в каждом узле временной сетки, представляют собой достаточно громоздкие вычислительные процедуры.

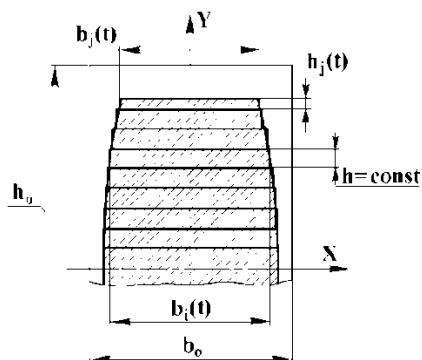


Рис. 1.1 – Моделирование процесса коррозии при изгибе с помощью набора полос

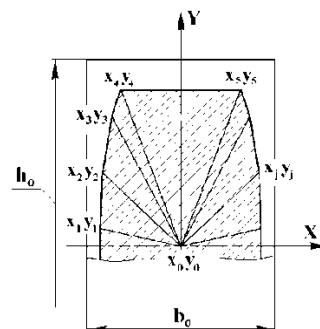


Рис. 1.2 – Моделирование процесса коррозии при изгибе с помощью треугольных фрагментов

В работе [49], очевидно, впервые было предложено использовать для построения модели прямоугольного сечения балки при чистом изгибе фрагменты аппроксимирующих функций. Для моделирования изменения размеров и формы сечения при коррозионном деформировании изменялись координаты нескольких характерных точек. В более поздней работе [50] подобный метод был применен на случай поперечного изгиба и сложного сечения, которое можно представить в виде совокупности прямоугольных фрагментов. В дальнейшем развитие данного подхода позволило создать модель корродирующей поверхности балки при чистом изгибе [34], а также построения балочных конечных элементов переменной жёсткости [31].

В элементах ШСК возникают только усилия растяжения или сжатия, и поле напряжений однородно по области сечения стержней. Форма сечения стержня при изменении его размеров остается постоянной. Однако при построении моделей сечений несимметричных профилей (швеллер, уголки) приходится учитывать возможное изменение положения центра тяжести и главных осей сечений. Эта информация существенна для вычисления моментов инерции сечения, необходимых при определении критических напряжений потери устойчивости в элементах, работающих на сжатие.

В [35] приведены модели корродирующих сечений стандартных профилей, состоящие из совокупности прямоугольных фрагментов. Процесс накопления геометрических повреждений в корродирующих сечениях моделируется путём изменения размеров прямоугольных фрагментов на величину  $\delta$  - глубину коррозионного поражения. Тем не менее, модели такого типа, при внешнем сходстве с реальными профилями, не учитывают такие параметры реальных сечений, как радиусы скругления, углы наклона полок. Это является существенным недостатком данных моделей и ограничивает их практическую применимость. При простом переносе размеров реальных стандартных профилей на модель, их геометрические характеристики (площадь, периметр, момент инерции), а также процесс их изменения во времени будут существенно отличаться. Для успешного использования подобных моделей необходимы методики определения размеров модельных сечений, которые обеспечивали бы соответствие их характеристик реальным профилям как в начальный момент времени, так и в процессе коррозионного деформирования.

Анализ литературных источников по проблеме построения математических моделей корродирующих сечений элементов ШСК позволил прийти к выводу о том, что до настоящего времени практически отсутствуют работы, посвящённые созданию моделей корродирующих сечений стержневых элементов стандартных профилей и исследованию их поведения во времени. Таким образом, данная проблема сохраняет свою актуальность.

### **1.3 Проблемы оптимального проектирования конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах**

Под задачей оптимального проектирования конструкций подразумевается нахождение наиболее эффективного проекта конструкции, несущей заданные нагрузки, в условиях противоречивых требований [4]. Достаточно полный обзор по вопросу истории и современного состояния



прикладной оптимизации, в частности, оптимального проектирования конструкций приводится в работах [4, 68, 71, 99, 119, 107, 108].

Значительное место в истории развития теории оптимального проектирования занимают такие зарубежные исследователи, как Я. Арора, Н.В. Баничук, И.Б. Лазарев, В.П. Малков, Н. Ольхофф, Л.В. Петухов, А. Палмер, В.Д. Райзер, В.А. Троицкий, Э. Хог. Существенный вклад в решение данной проблемы внесли украинские ученые: В.А. Баженов, В.А. Бараненко, А.И. Виноградов, В.Н. Гордеев, В.Б. Гринёв, В.И. Гуляев, А.С. Дехтярь, А.П. Дзюба, Д.Г. Зеленцов, И.А. Колесник, Ю.М. Почтман, В.В. Скалозуб, Г.В. Филатов, А.П. Филиппов и другие.

### 1.3.1 Вычислительные методы в задачах оптимального проектирования корродирующих конструкций

Первой работой, посвященной проблеме оптимального проектирования конструкций, функционирующих в агрессивных рабочих средах, следует считать, очевидно, работу [91]. В данном исследовании рассматривалась задача весовой оптимизации гладкой цилиндрической оболочки, подверженной атмосферной коррозии. В работе применялась модель коррозионного износа, не учитывающая влияние напряжений и, в связи с этим, позволяющая получить аналитическое решение задачи. В дальнейшем применительно к той же конструкции были рассмотрены более сложные модели коррозионного износа и критерии оптимальности [46, 78].

В числе важнейших исследований по проблеме оптимального проектирования конструкций, подверженных механическому и химическому разрушению, следует указать работы И.Г. Овчинникова, Ю.М. Почтмана и их учеников. Обзор работ по данной проблеме приведен в [48, 79].

Развитию методов оптимального проектирования конструкций, подверженных влиянию агрессивных сред, был посвящен ряд работ [24, 91, 92]. Оптимизационные задачи, как правило, формулировались как задачи нелинейного математического программирования (НЛП). Поставленные

задачи решались при помощи аналитических оптимизационных методов [91, 92], либо численно [24]. Выбор метода численного решения обуславливался, как правило, конкретной поставленной задачей.

В работах [13, 24, 32] была предложена процедура определения оптимальных параметров корродирующих стержней и стержневых систем. В них рассматривались агрессивные рабочие среды различных типов (влажная воздушная среда, электролиты, водородосодержащие среды), различные виды стержней.

Статьи [24, 29, 32] посвящены выбору оптимальных размеров поперечных сечений и долговечности статически определимых и неопределимых шарнирно-стержневых систем, подверженных атмосферной коррозии. В [94] рассмотренная постановка была обобщена на случай, когда скорость коррозии зависит от напряжений в элементах системы.

В работе [2] рассматривалась проблема оптимального проектирования рамных систем. Параметры сечений конструктивных элементов выступали в качестве варьируемых параметров (ВП).

Широкое распространение применительно к задачам оптимального проектирования корродирующих конструкций получил в последние десятилетия метод конечных элементов (МКЭ) [31–33, 41, 43, 72, 93, 106]. Однако использование МКЭ приводит к существенному увеличению вычислительных затрат при решении задач оптимизации. Для их уменьшения в ранних работах рассматривались конструкции, расчетная схема которых позволяла использовать минимальное количество конечных элементов и максимально большой шаг интегрирования при решении СДУ [41, 45, 47].

В других работах оптимальный проект предлагалось искать без учета коррозионного износа, а в дальнейшем наращивать полученные параметры конструкции на величину, определяемую с помощью решения обратной задачи Коши на основании параметров агрессивной среды, необходимой долговечности и уровня нагружения [48]. С помощью этого алгоритма из одного решения оптимизационной задачи без учета влияния агрессивной

среды можно получить семейство оптимальных решений для возникающих частных случаев. К недостаткам алгоритма, однако, относится его применимость только для отдельных классов конструкций, только при активных ограничениях по прочности и только в случае, когда каждый варьируемый параметр соответствует одному конечному элементу.

В [40] предлагалось снизить вычислительные затраты, приближенно вычисляя долговечность конструкции на начальных итерациях поиска оптимального проекта с помощью аналитических формул. В целом состояние проблемы оптимального проектирования конструкций с использованием МКЭ рассматривается в работах [4, 108].

В работах [36, 40, 64] для повышения эффективности предлагалось использовать метод скользящего допуска (МСД), позволяющий уменьшить вычислительные затраты за счёт изменения точности вычисления функций ограничений на различных этапах решения задачи оптимизации. Однако алгоритмы этого метода не гарантировали получения результата с требуемой точностью. Для этого необходим метод управления погрешностью численного решения СДУ, моделирующих процесс накопления геометрических повреждений в элементах конструкций.

На основании приведенного обзора литературных источников по проблеме оптимального проектирования корродирующих конструкций очевидно, что главная проблема при решении данной задачи – проблема вычислительных затрат при получении решения (то есть, эффективности вычислительных методов) и контроля его погрешности.

Во всех приведенных работах задача оптимального проектирования ШСК формулировалась в непрерывной постановке. В качестве параметров конструкции принимались размеры сечений, меняющиеся непрерывно в заданных границах. В реальности, однако, ШСК изготавливаются из прокатных профилей, все размеры которых регламентируются стандартами, и меняются дискретно. В связи с этим большой интерес представляет дискретная постановка задачи оптимального проектирования.

### 1.3.2 Вычислительные проблемы, связанные с дискретной постановкой задачи оптимизации

Фундаментальная информация по теории дискретной оптимизации приводится в [63]. Как отмечается в работе [63], в задачах дискретного математического программирования областью допустимого изменения значений каждой переменной является некое заданное конечное множество чисел. При рассмотрении в дискретной постановке задачи оптимального проектирования ШСК в качестве такого множества может выступать множество индексов – типов и типоразмеров стандартных сечений.

Задачам дискретной оптимизации конструкций уделяется значительное внимание как отечественными, так и зарубежными исследователями. При этом в различных работах рассматривается оптимизация как параметров [115, 119, 122, 123], так и топологии конструкций [113, 119]. Задачам дискретной оптимизации, а также задачам структурно-параметрической оптимизации, в которых одновременно присутствуют дискретно и непрерывно изменяющиеся варьируемые параметры, уделяется внимание в обзоре [85], посвященном современному этапу развития области оптимального проектирования металлических конструкций.

При решении задач дискретной оптимизации невозможно использование градиентных методов. Распространенным методом решения задач данного класса является метод случайного поиска [63]. Его недостатком, однако, является сравнительно невысокая вероятность нахождения глобально-оптимального решения. Альтернативой является использование генетических алгоритмов, основанных на моделировании процессов эволюционного развития популяций. Генетические алгоритмы позволяют получить близкие к глобальному оптимуму решения, и получают все более широкое практическое применение [5, 114, 115, 119, 122, 123].

В генетических алгоритмах искомые параметры могут задаваться не только в виде числовых значений, но и на конечных множествах произвольной природы. Это делает удобным их использование в задачах дискретной

оптимизации. Стратегия поиска в таких алгоритмах построена на вычислении и сравнении значений некоторой целевой функции в точках рассматриваемого пространства. Вместе с тем, требования к унимодальности, непрерывности, дифференцируемости такой функции не выдвигаются [114].

В работе [86] был предложен способ кодирования проектов металлических конструкций в бинарные строки, а также разработана функция оценки подобных строк.

В работах [116, 117] рассматривались вопросы оптимального проектирования ШСК при помощи генетических алгоритмов. В качестве варьируемых параметров использовались площади сечений стержневых элементов и координаты узлов конструкции.

Во всех приведенных выше работах задача дискретной оптимизации конструкций решалась без учета коррозионного износа, вызванного влиянием агрессивной среды. Очевидно, впервые ряд дискретных постановок задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций был предложен в диссертационной работе [40]. Для решения задачи предлагалось использование метода случайного поиска и генетических алгоритмов. В работе был решен ряд задач весовой оптимизации статически неопределимых шарнирно-стержневых, балочных и рамных конструкций. Задачи формулировались как задачи параметрической и структурной оптимизации.

К недостаткам данной работы, однако, можно отнести отсутствие достаточно точных моделей корродирующих сечений. Как было указано в разделе 1.2 данного обзора, модели стандартных профилей, состоящие из прямоугольных фрагментов сечений, при внешнем сходстве с реальными профилями, не учитывают такие параметры реальных сечений, как радиусы скругления, углы наклона полок.

Исходя из всего сказанного выше, несмотря на значительную практическую ценность подхода к решению задач оптимального проектирования корродирующих конструкций, согласно которому

множество решений задачи является дискретным, данная проблема получила мало освещения в известной литературе. Задачи дискретной оптимизации корродирующих конструкций все еще сохраняют свою актуальность.

### 1.3.3 Численные методы решения систем дифференциальных уравнений

Составляющей частью проблемы эффективности вычислительных процедур при решении задач оптимизации корродирующих конструкций является проблема численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозии. Размерность этой системы определяется количеством параметров, описывающих геометрические размеры конструкции. Таких параметров, в зависимости от конструкции, могут быть десятки и сотни.

Правые части уравнений системы включают в себя нелинейные функции напряжений, заданные, в общем случае, в виде некоторого вычислительного алгоритма, например, метода конечных элементов [39]. Точность решения таких систем во многом определяет точность решения оптимизационной задачи в целом. Это делает актуальной задачу выбора таких параметров численных процедур, которые позволили бы одновременно снизить вычислительные затраты при вычислении функции ограничений и обеспечить необходимую точность решения. Проблемы регулирования точности численных алгоритмов были отражены в работах [10, 111].

Статья [65], очевидно, является одной из первых работ, рассматривающих задачу уменьшения количества узловых точек при численном интегрировании СДУ с использованием метода динамического программирования.

В работах [44, 53, 55] для уменьшения вычислительных затрат при решении СДУ предлагается упрощение расчетной схемы конструкции. В работах [31, 33, 44] для достижения этой же цели предлагается уменьшение размерности системы путём создания конечных элементов переменной

жесткости. В [27, 29, 47] количество узловых точек при решении СДУ сокращается при помощи использования аналитических формул. Все эти подходы, однако, не позволяют прогнозировать погрешность решения, а тем более, управлять ею. Так как задача определения долговечности корродирующей конструкции является составляющей общей задачи оптимального проектирования, то проблемы повышения эффективности вычислительного метода приобретают самостоятельное значение.

Получить в явном виде аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих коррозионный износ в элементах конструкции, возможно только в частных случаях для некоторых статически определимых систем [28, 29, 47, 50, 51, 97]. Для большинства реальных механических систем, напряженное состояние которых неоднородно, возможно только численное решение задачи напряженно-деформированного состояния и, соответственно, задачи долговечности.

Как правило, для решения СДУ используются методы типа Рунге-Кутты [32, 77, 79, 106, 109]. Проблема использования таких методов состоит в необходимости обеспечить противоречивые требования эффективности и точности получаемого решения, то есть, выбрать рациональный шаг интегрирования, который позволил бы обеспечить требуемую точность решения задачи при минимальных вычислительных затратах. В некоторых работах [79, 88] приводятся рекомендации по выбору параметров вычислительных процедур, однако они носят частный характер и не всегда обоснованы в достаточной степени.

Недостаток рекомендаций по выбору рационального шага интегрирования при решении СДУ может быть обусловлен сложностью получения эталонного решения, то есть решения, полученного точно или с контролируемой погрешностью. Теоретически оно может быть получено как асимптотически точное решение при выборе очень маленького шага интегрирования, что требует значительных вычислительных затрат [43] и может применяться только для конкретной модели объекта. При поиске

оптимального проекта корродирующей конструкции ее параметры изменяются в широких диапазонах. Если при изменении параметров конструкции параметры численного решения задачи остаются неизменными, они будут обеспечивать необходимую точность только для некоторого подмножества решений. Назначение же параметра, обеспечивающего требуемую точность решения для всего множества возможных решений, приведет к существенному увеличению вычислительных затрат, что для задач оптимизации, когда СДУ решается многократно на каждой итерации поиска оптимального проекта, особенно проблематично. Более того, в некоторых источниках, например, [62], показано, что в отдельных случаях уменьшение шага интегрирования будет приводить не к уменьшению, а к увеличению погрешности, особенно когда функции напряжений в правых частях дифференциальных уравнений определяются с помощью вычислительного алгоритма.

В [50] показано, что на изменение напряжений в элементах ШСК оказывают влияние два фактора: уменьшение площадей сечений стержневых элементов в результате коррозионного деформирования и изменение внутренних усилий. На первый из этих факторов влияет глубина коррозионного поражения только в данном элементе, на второй – глубина коррозионного поражения во всех элементах конструкции. При этом, согласно результатам численных экспериментов, скорость изменения геометрических размеров элементов значительно выше, чем изменения внутренних усилий, и влияние первого фактора значительно превышает влияние второго. Это позволяет, где это возможно, использовать аналитические формулы долговечности для отдельных элементов конструкции, полученные в предположении, что внутренние усилия в конструкции постоянны [32, 47, 51, 54, 60, 62].

В работе [41] аналитические формулы использовались при оптимизации корродирующих пластин по критерию металлоемкости для вычисления приближенной долговечности конструкции. Полученное



аналитически значение долговечности в дальнейшем использовалось в качестве начального приближения, и его окрестность принималась в качестве новой области поиска. Далее уточненное решение СДУ искалось численно в данной области. Такой подход позволял использовать малое количество узловых точек на интервале изменения времени на втором этапе решения задачи, что существенно повышало эффективность решения задачи.

Метод, основанный на использовании аналитической формулы, полученной для стержня произвольного сечения при одноосном нагружении, был, очевидно, впервые предложен в работе [47], а в дальнейшем получил развитие в работах [50, 60–62]. Он предполагал использование гораздо меньшего, чем в большинстве известных методов, количества узловых точек на интервале изменения времени при решении СДУ. На каждом шаге, однако, было необходимо искать численные решения нелинейных функциональных уравнений, количество которых определялось числом элементов ШСК. Несмотря на наличие недостатков, использование данного метода позволило повысить эффективность вычислений. В работах [28, 56] подобный подход был использован для плосконапряженных пластин, а в работах [27, 54] – для пластин в условиях изгиба.

Алгоритм, предполагающий использование в качестве параметра вычислительной процедуры не шага по интервалу изменения времени, а шага по интервалу изменения напряжений был использован в работе [97]. Наличие у функции, описывающей зависимость напряжений от времени, точки разрыва второго рода в некоторых случаях приводило к аварийному завершению вычислительной процедуры, либо к получению неправильного решения задачи. Использование данного подхода позволило увеличить надежность метода, а также повысить его эффективность благодаря использованию более редкой временной сетки на начальных шагах решения СДУ и более густой – к концу временного интервала.

Вышеизложенные подходы позволили значительно повысить эффективность численных методов решения систем дифференциальных

уравнений, описывающих процесс коррозионного деформирования в конструкционных элементах. Они, однако, не дают ответа на вопрос о погрешности получаемого решения, и проблема обеспечения заданной точности решения СДУ требует отдельного рассмотрения.

#### 1.3.4 Обеспечение заданной точности решения систем дифференциальных уравнений

В данном разделе предлагается анализ работ, посвященных обеспечению заданной точности (управлению погрешностью) решения СДУ, описывающих коррозионный износ в элементах конструкции. Под обеспечением заданной точности подразумевается назначение параметров вычислительных процедур, которые обеспечивали бы получение результата с погрешностью, не превышающей величины, заданной заказчиком.

Для решения данной задачи представляется перспективным подход, основанный на формализации зависимости между погрешностью решения, начальными значениями напряжений в элементе, характеристиками его сечений (площадью, периметром, моментом инерции), параметрами агрессивной среды и параметром численного решения. Такая формализация была осуществлена с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) [64, 95].

Анализ степени влияния различных факторов на точность решения систем дифференциальных уравнений, необходимый для успешного решения данной задачи, приведен в работах [50, 64, 95].

В [42] предлагалось определять величину шага интегрирования для решения СДУ при помощи ИНС, формализующей зависимость между периметром сечения стержня, площадью его сечения, начальным напряжением в нем, скоростью коррозии при отсутствии напряжений и шагом интегрирования. Для различных предельно допустимых значений погрешности были получены различные матрицы синаптических весов.

Хотя вышеописанные методы позволяли контролировать погрешность решения СДУ, они имели также ряд существенных недостатков, к которым можно отнести следующее:

1. В приведенных работах не принималась во внимание форма сечения элементов ШСК. Вместо этого рассматривались модельные ШСК со стержнями кольцевого сечения, что ограничивало практическую применимость полученных результатов.

2. Игнорирование формы сечения стержней не позволяет использовать приведенный метод для случая, когда долговечность конструкции определяется активными ограничениями по устойчивости.

3. При использовании в ШСК таких типов стандартных профилей как двутавр и швеллер возможна полная коррозия полки стержневого элемента и разрушение его в результате нарушения сплошности сечения. При игнорировании формы сечения возможность такого типа ограничений также не учитывается.

### **Выводы по главе 1**

Как показывает анализ литературных источников по проблеме математического моделирования и оптимизации корродирующих конструкций, развитию этого направления уделяется немалое внимание как в Украине, так и за рубежом. Актуальность данной проблемы объясняется большим числом конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию агрессивных сред, в различных отраслях промышленности, а также значительными убытками при аварийном выходе таких конструкций из строя.

Однако, несмотря на широкое развитие теории моделирования и оптимального проектирования корродирующих конструкций, некоторые аспекты данной проблемы все еще далеки от окончательного решения:

1. В большинстве известных работ в качестве объектов исследований рассматривались абстрактные конструкционные элементы. Работ,

посвященных моделированию поведения реальных корродирующих конструкций (с элементами из стержней стандартных профилей) и их оптимальному проектированию практически не встречается.

2. Для создания адекватной модели коррозионного деформирования конструкций с элементами из стандартных профилей необходимы новые модели корродирующих сечений.

3. Решение задач оптимизации корродирующих ШСК в большинстве работ искалось на непрерывном множестве варьируемых параметров, что существенно снижало их практическую ценность. Поскольку размеры сечений реальных ШСК регламентированы нормативными документами, большой интерес представляет решение задач оптимизации корродирующих ШСК на дискретном множестве варьируемых параметров.

4. Существующие нейросетевые алгоритмы управления погрешностью численного решения задачи долговечности корродирующих ШСК не могут быть применены к реальным конструкциям, так как не учитывают форму сечения, и требуют дальнейшего усовершенствования.

5. Решение задач дискретной оптимизации ШСК, подверженных коррозионному износу, с требуемой точностью и за приемлемое время невозможно с использованием уже существующих методов. Для этого необходима их адаптация и создание нового эффективного вычислительного метода для решения задач такого класса.

В связи со всем вышеизложенным особую актуальность приобретает проблема разработки новых моделей коррозионного деформирования и эффективных методов дискретной оптимизации ШСК, обеспечивающих решение с требуемой точностью и с минимальными вычислительными затратами.

## ГЛАВА 2

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМНЫХ АСПЕКТОВ ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ

В данной главе предлагается обобщённая математическая постановка задачи определения оптимальных параметров корродирующей конструкции в с учетом происходящей в ней физико-химических процессов. Для определённости в качестве объекта исследования рассматривается шарнирно-стержневая конструкция (ферма).

Анализируются проблемы, связанные с постановкой, в которой решение оптимизационной задачи ищется на дискретном множестве (множестве индексов). На основании проведенного анализа проблемы предлагается новая концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих ШСК, которая отличается от существующих тем, что поиск оптимального проекта осуществляется на дискретном множестве решений, используется усовершенствованная модель процесса коррозионного деформирования и новая модель управления погрешностью вычисления функции ограничений оптимизационной задачи.

Материал данной главы основан на работах автора [18, 25, 26, 30].

#### **2.1 Обобщенная математическая постановка задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций**

При постановке задачи оптимального проектирования конструкций для описания объекта оптимизации используется набор независимых параметров, характеризующихся некоторым численным значением. Параметры проекта должны быть значимыми, то есть описывать существенные свойства объекта, а их количество должно быть минимально достаточным для описания

объекта в рамках решаемой задачи. В их число входят как варьируемые параметры (параметры оптимизации), так и постоянные параметры, обусловленные технологическими требованиями. На варьируемые параметры могут быть наложены ограничения, от которых будут зависеть границы их изменения.

Несмотря на то, что прикладные задачи оптимального проектирования относятся к различным областям, для их описания можно использовать общую форму. Все эти задачи можно классифицировать как задачи минимизации вещественной функции  $F(\bar{x})$   $N$ -мерного векторного аргумента  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , компоненты которого удовлетворяют системе уравнений  $h_k(x) = 0$ , набору неравенств  $g_i(x) \geq 0$ , а также ограничены сверху и снизу, то есть  $x_i^- \leq x_i \leq x_i^+$ . Задача определения оптимальных параметров сводится к задаче нелинейного математического программирования:

$$F(\bar{x}) \rightarrow \text{extr}, \quad \bar{x} \in X_D, \quad (2.1)$$

где  $X_D = \{\bar{x} \in E^n \mid g_i(x) \geq 0, h_k(x) = 0, i \in [1, N], k \in [1, M]\}$ ,  $X_D$  – допустимая область решения задачи оптимизации;  $E^n$  – пространство, в котором определена целевая функция;  $g_i(x)$  и  $h_k(x)$  – функции ограничений. В дальнейшем изложении функцию  $F(\bar{x})$  будем называть целевой функцией, вектор  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  – вектором варьируемых параметров (ВП), уравнения  $h_k(x) = 0$  – ограничениями в виде равенств, а неравенства  $g_i(x) \geq 0$  – ограничениями в виде неравенств.

Исходя из используемого критерия качества оптимизируемого объекта, формулируется целевая функция. Прямыми ограничениями называют ограничения-неравенства, имеющие вид  $x_i \geq x_i^-$  или  $x_i \leq x_i^+$ , где  $x_i^-$ ,  $x_i^+$  – заданные константы, остальные ограничения называют функциональными.

Подробное изложение классической теории нелинейного программирования приведено в [107]. В дальнейшем в тексте

диссертационной работы рассматриваются вопросы параметрической оптимизации для оптимального проектирования корродирующих шарнирно-стержневых конструкций. К особенностям задач данного типа можно отнести то, что в функции ограничений время входит в качестве параметра задачи.

В работе рассматриваются стержневые конструкции, состоящие из элементов стандартных прокатных профилей, с произвольными граничными условиями и условиями нагружения. Сосредоточенные силы, приложенные в узлах, являются внешними нагрузками. Предполагается, что они носят детерминированный характер. При моделировании поведения конструкции в агрессивной среде принимаются следующие предположения:

- в местах соединений стержней процесс коррозии протекает так же, как в конструкции в целом;

- в конструкции отсутствуют монтажные напряжения; величина напряжений в элементах определяется только внешними нагрузками и собственным весом стержней.

В данной диссертационной работе под оптимальной конструкцией понимается конструкция, объем которой был бы минимальным, и при этом она удовлетворяла бы условиям прочности, устойчивости и сплошности сечения (в случаях двутаврового и швеллерного профилей) на протяжении заданного срока эксплуатации, то есть сохраняла несущую способность в течение заданного периода времени.

Пусть ферма состоит из  $N$  стержневых элементов произвольного поперечного сечения, часть которых работает на растяжение, часть – на сжатие. Необходимо выбрать параметры конструкции таким образом, чтобы её объём при этом был минимальным.

В виде задачи нелинейного математического программирования задачу оптимального проектирования корродирующих конструкций можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{aligned}
F(\bar{x}) &= \sum_{i=1}^N L_i A_i(\bar{x}) \rightarrow \min; \bar{x} \in X_D; \\
X_D &: \{\bar{x} \in I^n \mid g_1(\bar{x}) = [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0; \\
&g_2(\bar{x}) = \sigma_j^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_j(\bar{x}, t^*) \geq 0; i \in \overline{1, N}; j \in J\},
\end{aligned} \tag{2.2}$$

где  $L_i, A_i$  – длина и площадь сечения  $i$ -го элемента;  $N$  – количество элементов в конструкции;  $\bar{x}$  – вектор варьируемых параметров;  $\sigma_i$  – текучее напряжение в  $i$ -м элементе;  $[\sigma]$  и  $\sigma_j^*$  – граничное значение напряжения и критическое напряжение потери устойчивости в  $j$ -м элементе;  $J$  – множество элементов, работающих на сжатие;  $t^*$  – заданное время эксплуатации конструкции.

В большинстве предыдущих работ в области оптимального проектирования корродирующих шарнирно-стержневых конструкций [32, 45, 61, 64, 96, 109] в качестве варьируемых параметров рассматривались размеры сечений стержневых элементов. При этом принималось, что форма сечения, к примеру, круглая или кольцеобразная. Варьируемые параметры изменялись непрерывно в заданных границах. Поскольку в реальности ШСК изготавливаются из стержней стандартных профилей (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголки), все размеры которых регламентированы стандартами и, во-первых, меняются дискретно от типоразмера к типоразмеру, и, во-вторых, не могут изменяться независимо друг от друга, это ограничивало практическую применимость такого подхода.

В данной работе предлагается рассматривать шарнирно-стержневые конструкции, элементы которых изготавливаются из стандартных прокатных профилей. В этом случае в качестве варьируемых параметров будут выступать не геометрические размеры сечений элементов, а тип и типоразмер стандартного сечения, то есть, вектор варьируемых параметров представляет собой совокупность индексов. Множество решений оптимизационной задачи, таким образом, будет являться дискретным.



В обобщённой постановке (2.2) вид критерия оптимальности не влияет на функции ограничений, обеспечивающих функциональную способность конструкции в процессе эксплуатации.

На рис. 2.1 приводится схема решения задачи определения оптимальных параметров корродирующей конструкции.

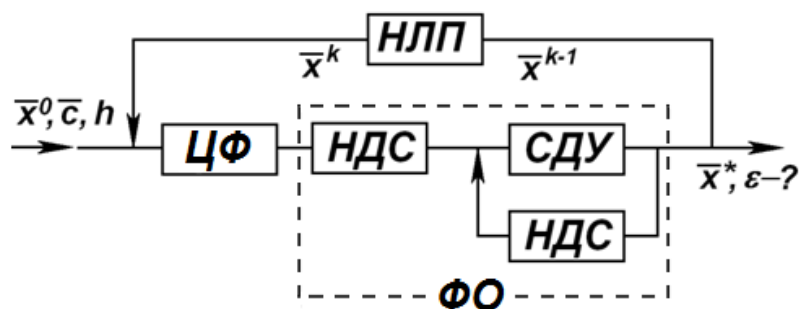


Рис. 2.1 – Схема решения задачи оптимизации

На рис. 2.1: ЦФ – модуль вычисления целевой функции, НДС – модуль решения задачи напряженно-деформированного состояния, СДУ – модуль решения системы дифференциальных уравнений, НЛП – модуль решения задачи нелинейного математического программирования, ФО – совокупность модулей, обеспечивающих вычисление функции ограничений задачи,  $\bar{c}$  – вектор параметров агрессивной среды,  $h$  – параметр численного решения,  $\varepsilon$  – погрешность решения задачи (погрешность вычисления функции ограничения).

Очевидно, что вычислительные затраты на решение такой задачи за счет наличия обратной связи при вычислении функций ограничений многократно превышают вычислительные затраты для решения классической задачи оптимизации. При использовании традиционной схемы решения оптимизационной задачи, представленной на рис. 2.1, погрешность получаемого решения прогнозу не поддается.

В большинстве известных работ вопрос точности получаемого решения не ставился, и для его оценки требовалось решать одну и ту же задачу несколько раз с различным параметром численного решения СДУ. Одной из отличительных особенностей данной диссертационной работы является то,

что в предлагаемой постановке задачи предельно допустимая погрешность решения рассматривается как входной параметр задачи. Такая постановка позволяет не только улучшить качество получаемых конструкторских решений, но и обеспечить их достоверность.

При решении оптимизационной задачи, с учетом вышеперечисленных особенностей ее постановки, возникает ряд проблем.

1. Традиционные постановки задач корродирующих ШСК предполагали поиск решения на непрерывном множестве варьируемых параметров, что существенно снижало их практическую ценность. При решении задачи оптимизации в постановке (2.2) варьируемыми параметрами являются индексы (тип и типоразмер стандартного профиля). Для решения таких задач невозможно использование большинства методов математического программирования.

2. Влияние напряжений на скорость коррозии предполагает численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс накопления геометрических повреждений в элементах конструкции. Функции напряжений в правых частях уравнений системы задаются, в общем случае, в виде вычислительного алгоритма. Поэтому в каждом узле временной сетки решается задача напряжённо-деформированного состояния, например, с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Это обуславливает высокие временные затраты на решение оптимизационной задачи и выдвигает повышенные требования к эффективности используемого вычислительного метода.

3. Поскольку в данной постановке задачи оптимизации рассматриваются стержневые элементы, изготовленные из стандартных прокатных профилей (двутавр, швеллер, уголок), для адекватного определения параметров элементов конструкции необходима усовершенствованная модель коррозионного деформирования ШСК, включающая в себя новые модели корродирующих сечений.

4. Погрешность вычисления функции ограничений при использовании

традиционной схемы решения задачи оптимизации корродирующих конструкций, представленной на рис. 2.1, не может быть проконтролирована. Следовательно, достоверность полученного решения может быть поставлена под сомнение.

Перечисленные особенности, очевидно, требуют модификации существующих методов решения оптимизационных задач. Степень модификации будет определяться теми проблемами, которые объективно следуют из постановки задачи. Анализ этих проблем посвящен раздел 2.2.

## **2.2 Анализ проблемных аспектов задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций**

Остановимся на анализе вышеперечисленных проблемных аспектов решения задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций более подробно. Очевидно, что без детального анализа данных проблем невозможно предложить эффективную и надёжную методику решения задачи в целом.

Численные иллюстрации, рассмотренные в данной главе, имели место при решении конкретных задач долговечности или оптимального проектирования с помощью известных методик.

### **2.2.1 Проблемы, обусловленные влиянием напряжений на скорость коррозионного деформирования**

Математические модели поведения многоэлементных металлических конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах и подвергающихся коррозионному разрушению, включают в себя две связанные между собой группы уравнений. Первая представляет собой уравнения механики деформированного твёрдого тела – уравнения равновесия и совместности деформаций, соотношения Коши и физические соотношения (для упругих тел – закон Гука).

Для шарнирно-стержневых конструкций матрица жесткости конечного элемента имеет вид [12]:

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha \\ -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

где  $E$ ,  $A$ ,  $L$ ,  $\alpha$  – модуль упругости, площадь сечения, длина и угол наклона стержневого элемента.

Элементы матрицы жесткости конструкции определяются путем суммирования соответствующих элементов матриц жесткостей элементов по алгоритму, представленному в [12].

Узловые перемещения определяются из уравнения:

$$\bar{R} = K^{-1} \cdot \bar{u}, \quad (2.4)$$

где  $\bar{R}$ ,  $\bar{u}$  – векторы узловых нагрузок и перемещений. Напряжения в стержневых элементах определяются через удлинения стержней, которые, в свою очередь вычисляются с учётом перемещений их узлов.

Так как площади сечений элементов изменяются в процессе коррозионного износа, то элементы матрицы жесткости конструкции, а, следовательно, и напряжения в элементах, являются переменными во времени.

Площади элементов являются функциями глубин коррозионного поражения  $\delta$ . Определение этих параметров предполагает решение задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 [1 + k\sigma_i(\bar{\delta})]; \quad \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}, \quad (2.5)$$

где  $\delta_i$  – глубина коррозионного поражения в  $i$ -м элементе;  $v_0$  – скорость коррозии при отсутствии напряжений,  $k$  – коэффициент, описывающий

влияние напряжений на скорость коррозии,  $N$  – количество стержневых элементов.

Так как процедура определения напряжений в правых частях СДУ является вычислительным алгоритмом, система (2.5) может быть решена только численно, причём вычисление напряжений осуществляется в каждом узле временной сетки. Именно это определяет уровень вычислительных затрат, который нелинейно возрастает при увеличении размерности задачи и, как следствие, размерности СДУ.

На сегодняшний день существует значительное число программных комплексов, таких как SCAD, ANSYS, SolidWorks Simulation, позволяющих получить решение задачи НДС для широкого класса конструкций. Однако, разработчиками данных программных комплексов, как правило, не была предусмотрена возможность использования их как составных частей или отдельных модулей в более сложных вычислительных комплексах. В частности, использование большинства данных программных комплексов для расчета корродирующих конструкций невозможно.

Система ANSYS, включающая в себя возможность учета дефектов и повреждений в модели МКЭ (трещины, коррозия) [81], является исключением, однако влияние напряжений на скорость коррозии в данном программном продукте не учитывается. Зачастую это влияние весьма значительно, и, таким образом, применение ANSYS для решения задач данного класса также невозможно.

Альтернативой данным программным продуктам являются программы, ориентированные на решение более специфических задач, в том числе – расчёт НДС и долговечности конструкций, подверженных воздействию сильноагрессивных сред [101, 102]. Возможности использования таких программ, однако, объективно ограничены размерностью задачи МКЭ.

Постановка задачи оптимизации, предлагаемая в данной диссертационной работе, предполагает минимизацию объёма конструкции при заданном значении её долговечности. Если параметр численного

решения СДУ (расстояние между узлами на интервале изменения времени) является входным и не изменяется в процессе решения задачи, то предполагаемое время её решения может быть определено по формуле:  $T_{\Sigma} = N_1 \cdot N_2 \cdot \tau$ , где  $N_1$  – количество итераций при решении задачи оптимизации;  $N_2$  – количество узлов временной сетки при решении СДУ,  $\tau$  – время решения задачи НДС с помощью МКЭ.

Количество итераций при решении задачи оптимизации зависит от размерности задачи (количества варьируемых параметров), применяемого метода решения и точности решения задачи.

В работе [50] приведены параметры алгоритма метода случайного поиска для решения задачи оптимального проектирования пятистержневой корродирующей фермы при заданной долговечности  $t^* = 1,25$  года. Количество варьируемых параметров принималось равным семи. При такой размерности оптимизационной задачи точность решения определяется обобщенными параметрами  $z_1$  и  $z_2$ . Поиск прекращался, когда были выполнены  $z_1=3$  серий шагов по  $z_2=50000$  итераций в каждой.

Алгоритм случайного поиска предполагал, что если при выполнении шага в данном направлении улучшения целевой функции не происходило, то выполнялся шаг в противоположном направлении. Таким образом, практически для каждого шага приходилось вычислять функцию ограничений. Общее количество вычислений функции ограничений можно принять равным 150000.

Для решения СДУ принимался шаг интегрирования  $\Delta t = 0,025$  года, что при заданной долговечности предполагало решение задачи МКЭ 50 раз. Общее количество обращений к процедуре МКЭ, таким образом, составило 7500000. Продолжительность решения задачи МКЭ зависит от большого количества факторов, в том числе возможностей вычислительной техники, рационального составления вычислительного алгоритма, языка программирования и т.д. Если время решения задачи МКЭ составляет

$\tau = 0,01$  сек, то время решения задачи в целом  $T_{\Sigma} = 2,8$  часа. Время решения задачи МКЭ при расчете более сложных реальных конструкций будет значительно большим. Следовательно, общее время получение результата также существенно увеличится.

Столь высокие вычислительные затраты при решении данной задачи делают весьма актуальным создание новых, более эффективных методов оптимального проектирования корродирующих конструкций.

### 2.2.2 Проблемы, обусловленные дискретной постановкой задачи оптимизации

В большинстве известных работ, рассмотренных в главе 1, задача оптимизации шарнирно-стержневых конструкций формулировалась в непрерывной постановке. В качестве варьируемых параметров выступали размеры сечений (например, внутренний и внешний радиус для кольцевого сечения), которые в заданных границах менялись непрерывно. Однако, сечения, рассматриваемые в таких задачах, как правило, являлись абстрактными.

Шарнирно-стержневые конструкции, как отмечалось выше, в реальности изготавливаются из стандартных прокатных профилей (двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголки), размеры которых регламентированы стандартами и изменяться непрерывно не могут. Параметры сечений, таким образом, привязаны к типоразмеру профиля и меняются дискретно. В связи с этим, задача оптимизации ШСК в дискретной постановке представляет большой практический интерес.

Использование градиентных методов решения оптимизационных задач, для которых необходима информация о производной минимизируемой функции, невозможно при решении задач дискретной оптимизации. Распространенным методом решения подобных задач является метод случайного поиска. Однако, для данного метода сравнительно невысока вероятность нахождения глобального экстремума.

Целесообразным для решения задач данного класса является использование генетических алгоритмов. При реализации генетических алгоритмов используется информация только о целевой функции и функциях ограничений, поэтому их эффективность объективно ниже, чем у методов математического программирования, использующих производные этих функций.

Один из методов повышения эффективности генетических алгоритмов состоит в минимизации вычислительных затрат при вычислении функций ограничений. В данной задаче вычисление функций ограничений предполагает численное решение системы дифференциальных уравнений, моделирующих коррозионный процесс.

Еще одной проблемой, возникающей при решении задачи оптимального проектирования корродирующей конструкции в дискретной постановке, является отсутствие адекватной модели коррозионного деформирования ШСК. В отличие от традиционных постановок, данная постановка задачи подразумевает, что ШСК состоит из элементов, изготовленных из стандартных прокатных профилей. Модели корродирующих сечений стержневых элементов являются необходимой составляющей модели коррозионного деформирования ШСК в целом, поэтому ее усовершенствование невозможно в отсутствие адекватных моделей сечений реальных профилей.

Анализ литературных источников по проблеме построения математических моделей корродирующих сечений элементов шарнирно-стержневых конструкций, приведенный в разделе 1.2 диссертационной работы, позволяет сделать вывод, что работы, посвященные созданию таких моделей, до настоящего времени практически не встречаются.

Автором предлагается использование новых моделей сечений, состоящих из совокупности треугольных фрагментов. Наличие таких сечений позволит разработать усовершенствовать модель коррозионного деформирования ШСК, необходимую для решения оптимизационной задачи.



Более подробно создание моделей корродирующих сечений будет рассмотрено в главе 3.

### 2.2.3 Проблемы, вызываемые сложностью контроля погрешности вычисления функций ограничений

При вычислении функций ограничений, предполагающем решение задачи долговечности, параметры корродирующей конструкции, нагрузок и агрессивной среды известны, поэтому погрешность решения СДУ будет определяться, преимущественно, параметром численной процедуры – расстоянием  $h$  между узловыми точками на временном интервале. Асимптотически точное решение, вне зависимости от конкретного численного метода, может быть получено при решении системы дифференциальных уравнений с последовательным уменьшением параметра  $h$ :

$$\lim_{h \rightarrow 0} z = y,$$

где  $z$  – численное решение;  $y$  – эталонное решение;  $h$  – расстояние между узловыми точками на временном интервале.

При решении задачи метода конечных элементов небольшой размерности асимптотически точное решение может быть получено со сравнительно небольшими вычислительными затратами. В дальнейшем полученная информация о параметре численного решения  $h$ , который позволяет обеспечить необходимую точность решения задачи долговечности, может быть использована при расчете других механических систем такого рода.

Однако если долговечность конструкции выступает в качестве ограничения при решении задачи оптимального проектирования, задача управления погрешностью значительно усложняется. Погрешность решения СДУ в этом случае будет дополнительно зависеть (помимо параметра численного решения) от геометрических размеров элементов,

варьирующихся в широком диапазоне, начальных и предельных значений напряжений и параметров агрессивной среды.

Поскольку на каждой итерации решения оптимизационной задачи параметры конструкции будут различаться, то использовать априорную информацию о влиянии расстояния между узловыми точками на временном интервале  $h$  на погрешность вычисления функций ограничений  $\varepsilon$  в данном случае невозможно.

Исходя из определения оптимизационной задачи, оптимальное решение находится на границе допустимой области пространства решений, определяемой активными ограничениями. Таким образом, погрешность численного решения определяет расстояние от точки пространства решений, соответствующей оптимальному проекту, до границы допустимой области. В результате, если погрешность вычисления функций ограничений в предполагаемой точке экстремума слишком велика, найденное проектное решение может не удовлетворять наложенным ограничениям. Достоверность получаемого результата, в таком случае, может быть поставлена под сомнение.

Для демонстрации примера возникновения такой ситуации рассмотрим задачу, приведенную в [51]. Рассматривается решение задачи оптимального проектирования десятиэлементной шарнирно-стержневой конструкции, в которой сжатые стержни имеют кольцевое сечение, растянутые – круглое. Варьируются внешние радиусы всех стержней, а также внутренние – для сжатых стержней. Принималась постоянная скорость коррозии при отсутствии напряжений в элементах  $v_0 = 0,1$  см/год, требуемый срок эксплуатации ШСК  $t^* = 1,25$  года. Расстояние между узловыми точками на интервале изменения времени при решении СДУ принималось равным 0,1 и 0,025 года.

В таблице 2.1 приведены оптимальные решения, полученные для вышеуказанных значений параметра вычислительного алгоритма.

Таблица 2.1

**Решение оптимизационной задачи при различных значениях параметра вычислительного алгоритма**

| № элемента | $\Delta t = 0,025$ ( $n = 50$ ) |         | $\Delta t = 0,1$ ( $n = 13$ ) |         |
|------------|---------------------------------|---------|-------------------------------|---------|
|            | $R, см$                         | $r, см$ | $R, см$                       | $r, см$ |
| 1          | 1,093                           | 0,616   | 1,085                         | 0,622   |
| 2          | 1,022                           | 0,000   | 1,044                         | 0,000   |
| 3          | 1,157                           | 0,617   | 1,157                         | 0,616   |
| 4          | 0,464                           | 0,000   | 0,461                         | 0,000   |
| 5          | 0,443                           | 0,036   | 0,445                         | 0,036   |
| 6          | 1,053                           | 0,638   | 1,053                         | 0,639   |
| 7          | 0,476                           | 0,000   | 0,476                         | 0,000   |
| 8          | 1,177                           | 0,874   | 1,115                         | 0,956   |
| 9          | 0,850                           | 0,000   | 0,850                         | 0,000   |
| 10         | 0,468                           | 0,000   | 0,467                         | 0,000   |
| $V, см^3$  | 1062,04 – проект (А)            |         | 1031,76 – проект (В)          |         |

Далее была произведена оценка точности данных решений. Для этого для полученных шарнирно-стержневых конструкций решалась задача прогнозирования долговечности при следующих значениях параметра численного решения: 0,025; 0,010; 0,005. Результаты приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

**Оценка точности решений оптимизационной задачи**

| $\Delta t$ | 0,025   | 0,010   | 0,005   |
|------------|---------|---------|---------|
| Проект (А) | 1,25183 | 1,25198 | 1,25199 |
| Проект (В) | 1,24037 | 1,20893 | 1,16254 |

Таким образом, при уменьшении расстояния между узловыми точками на временном интервале при решении СДУ оказывается, что проект (В) нарушает ограничения, наложенные на долговечность конструкции.

Если предположить, что нормативными документами для конструкций данного типа установлена максимальная погрешность, не превышающая

2,5%, данный проект оказывается неудовлетворительным. Следовательно, необходимо повторно решать задачу с другим параметром вычислительного алгоритма, а затем снова оценивать погрешность результата.

Назначение таких параметров численного решения, которые с высокой вероятностью позволят определить долговечность конструкции с погрешностью, не превышающей допустимую, на всем множестве решений приведет к чрезмерным вычислительным затратам, при которых решение нельзя будет получить за приемлемое время.

Для успешного решения данной проблемы, по мнению автора, необходимо разработать модель управления погрешностью вычисления функции ограничений оптимизационной задачи, позволяющую определять параметры численного решения СДУ на основании информации о параметрах конструкции (варьируемых и постоянных), параметрах агрессивной среды и величине допустимой погрешности.

### **2.3 Концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих шарнирно-стержневых конструкций**

На основании анализа проблемных аспектов решения задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций, приведенного в разделе 2.2 диссертационной работы, автором была предложена новая концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих шарнирно-стержневых конструкций (рис. 2.2).

Разработанная концептуальная модель отличается от существующих тем, что поиск оптимального проекта осуществляется на дискретном множестве решений, используются усовершенствованная модель процесса коррозионного деформирования и новая модель управления погрешностью вычисления функции ограничений оптимизационной задачи, необходимость создания которых обосновывалась в предыдущих разделах данной главы.

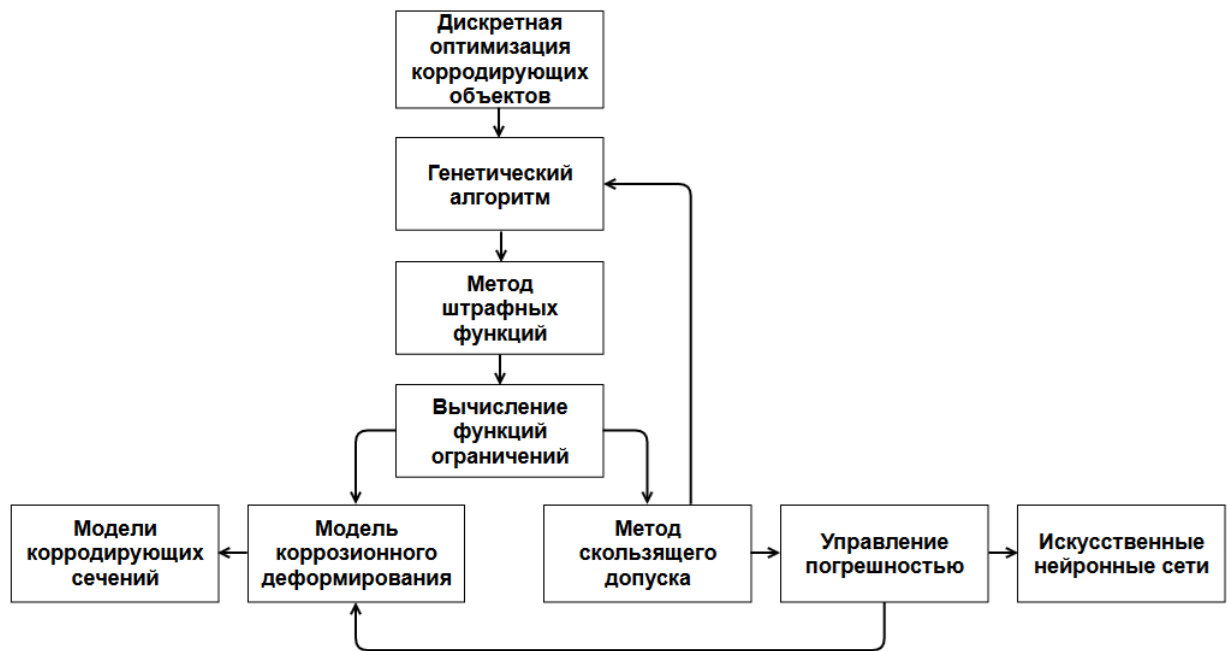


Рис. 2.2 – Концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих ШСК

На основании анализа проблем, возникающих в связи с дискретной постановкой оптимизационной задачи, был сделан вывод о том, что наиболее перспективным для дискретной оптимизации корродирующих объектов представляется использование генетических алгоритмов. Для приведения задачи оптимизации с ограничениями к задаче безусловной оптимизации использовался метод штрафных функций. Вычисление функций ограничений данной задачи требует численного решения СДУ, моделирующей процесс коррозии в элементах конструкции.

Для решения данной СДУ необходимо усовершенствовать модель коррозионного деформирования элементов ШСК путем создания новых моделей корродирующих сечений.

За счет наличия обратной связи в модели решения задачи, а также за счет достаточно низкой эффективности генетических алгоритмов, вызванной тем, что они используют информацию только о целевой функции и функции ограничений, вычислительные затраты при решении оптимизационных задач рассматриваемого класса достаточно высоки. Для уменьшения вычислительных затрат при одновременном обеспечении

требуемой точности решения задачи предлагается использование метода скользящего допуска. В качестве критерия скользящего допуска принимается допустимая погрешность вычисления функции ограничений оптимизационной задачи – убывающая функция от номера эпохи при работе генетического алгоритма. Для использования данного метода необходима новая модель управления погрешностью вычисления ФО, основанная на использовании искусственных нейронных сетей.

Отдельные составляющие данной концептуальной модели будут рассмотрены более подробно в последующих главах.

## **Выводы по главе 2**

1. Впервые предложена новая постановка задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций, предполагающая, в отличие от традиционных постановок, поиск решения на дискретном множестве решений. Варьируемыми параметрами являются индексы (тип и типоразмер стандартного профиля).

Для решения таких задач невозможно использование большинства методов математического программирования. Кроме того, для моделирования процесса коррозионного деформирования ШСК необходимы новые, более точные, чем использовались ранее, модели корродирующих сечений.

2. В отличие от известных постановок задач, предполагается получение решения с погрешностью, не превышающей заданной заказчиком величины. Поскольку погрешность вычисления функций ограничений зависит, прежде всего, от параметров численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающей коррозионный процесс в элементах ШСК, возможны два подхода к обеспечению этого требования.

Первый подход подразумевает назначение таких параметров, которые с высокой достоверностью будут обеспечивать заданную точность на всем

пространстве решений. Реализация этого подхода будет приводить к чрезмерным вычислительным затратам.

Альтернативный подход заключается в том, что допустимая погрешность является убывающей функцией итерации поиска решений оптимизационной задачи. На начальных итерациях она может быть достаточно высокой, в результате чего вычислительные затраты минимальны, а в окрестности экстремума погрешность не превышает величины, заданной заказчиком. Такой подход более эффективен, но предполагает наличие алгоритма управления погрешностью, в котором параметром управления является параметр численного решения СДУ.

3. На основании анализа проблемных аспектов решения задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций автором была предложена новая концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих ШСК, отличающаяся от существующих тем, что поиск оптимального проекта осуществляется на дискретном множестве решений, используется усовершенствованная модель процесса коррозионного деформирования и новый метод управления погрешностью вычисления функции ограничений оптимизационной задачи. Составляющие данной модели будут рассмотрены подробно в последующих главах.

### ГЛАВА 3

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МОДЕЛИ КОРРОЗИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Как отмечалось в главе 1, модель корродирующей поверхности (для стержневых конструкций – модель корродирующего сечения) является основной составляющей общей модели поведения конструкции, эксплуатирующейся в агрессивной среде, далее – модели коррозионного деформирования.

В рамках задач механики корродирующих конструкций возникает необходимость описания процесса изменения во времени деформаций и напряжений в их элементах, что, в свою очередь, вызывается изменением геометрических характеристик сечения. Изменение во времени параметров сечения стержня зависит как от параметров агрессивной среды, так и от параметров напряженно-деформированного состояния корродирующей конструкции. Это определяет актуальность проблемы создания математических моделей корродирующих сечений стержневых элементов и построения на её основе модели процесса коррозионного деформирования.

Составляющие модели коррозионного деформирования шарнирно-стержневых конструкций (ШСК) представлены на рис. 3.1.

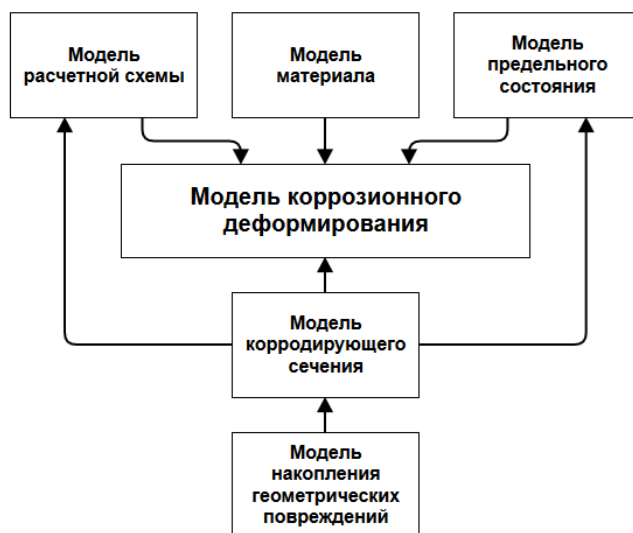


Рис. 3.1 – Модель коррозионного деформирования ШСК



В данной главе диссертационной работы предлагается усовершенствование модели коррозионного деформирования ШСК путем создания новых моделей корродирующих сечений элементов, изготовленных из стандартных прокатных профилей (двутавр, швеллер, уголок).

При моделировании поведения ШСК, изготовленных из стержней со стандартными сечениями, возникает ряд особенностей:

1. Вследствие большого периметра сечения стандартного профиля процесс коррозии в нём происходит значительно интенсивнее, чем, например, в стержне круглого, квадратного или кольцевого сечения.

2. В стержнях двутаврового и швеллерного профилей возможен третий тип разрушения – полная коррозия стойки и нарушение сплошности сечения;

3. При вычислении ограничения по устойчивости значения момента инерции сечений вычисляются по разным правилам.

4. В несимметричных профилях необходимо учитывать изменение во времени положения и ориентации главных осей.

Все вышперечисленные особенности должны быть учтены при разработке новых моделей корродирующих сечений.

Материал данной главы основан на работах автора [39, 76].

### **3.1 Проблемные аспекты существующих моделей корродирующих сечений**

В настоящем разделе предлагается описание существующих моделей корродирующих сечений для основных стандартных профилей (двутавр, швеллер, уголок), и рассматриваются проблемные аспекты их использования.

Корродирующее сечение двутаврового профиля представляется в виде совокупности трёх прямоугольных фрагментов (рис 3.2). Значения площади, периметра и минимального момента инерции сечения в произвольный момент времени определяются по формулам:

$$A = 2 \cdot B \cdot T + (H - 2 \cdot T) \cdot D, \quad (3.1)$$

$$P = 2 \cdot (H - 2 \cdot T) + 2 \cdot (2 \cdot B - D), \quad (3.2)$$

$$J_x = \frac{1}{12} [T \cdot B^3 + (H - 2T) \cdot D^3]. \quad (3.3)$$

Модель сечения швеллера представлена на рис 3.3. Швеллер, в отличие от двутавра, имеет одну ось симметрии, и его центральная ось будет смещаться по мере накопления геометрических повреждений.

Запишем выражение для момента инерции сечения швеллера относительно центральной оси  $X_0$  с учетом изменения ее положения в процессе эксплуатации элемента.

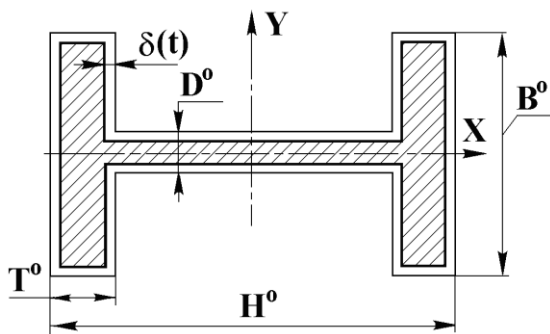


Рис. 3.2 – Поперечное сечение двутавра в произвольный момент времени

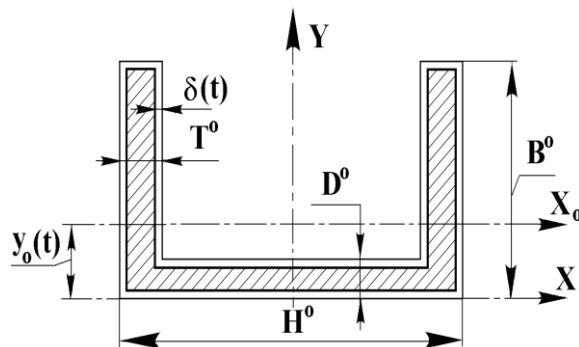


Рис. 3.3 – Поперечное сечение швеллера в произвольный момент времени

Положение центральной оси определится из известного соотношения:

$$y_0 = \frac{S_x}{A}, \quad (3.4)$$

где  $S_x$  – статический момент инерции сечения относительно оси  $X$ .

Выражения для площади, периметра и статического момента сечения швеллера имеют вид:

$$A = H \cdot D + 2 \cdot T \cdot (B - D), \quad (3.5)$$

$$P = 2 \cdot (H - T + 2 \cdot B - D), \quad (3.6)$$

$$S_x = \frac{1}{2} H \cdot D^2 + T \cdot [B^2 - D^2]. \quad (3.7)$$

Зная положение центральной оси, определим относительно нее значение момента инерции через значение момента инерции относительно оси  $X$ , выражение для которого запишется следующим образом:

$$J_x = \frac{2 \cdot B^3 \cdot T + D^3 \cdot (H - 2 \cdot T)}{3}. \quad (3.8)$$

Окончательно значение момента инерции сечения швеллера относительно центральной оси  $X_0$  запишется в виде:

$$J_{x0} = J_x - 2 \cdot y_0 \cdot S_x + y_0^2 \cdot A. \quad (3.9)$$

Сечение уголкового профиля представлено на рис 3.4.

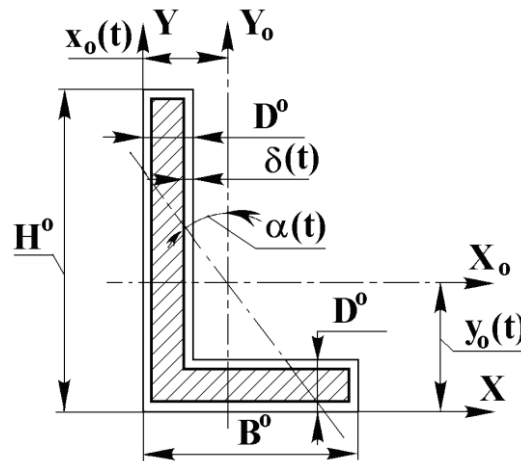


Рис. 3.4 – Поперечное сечение уголкового профиля в произвольный момент времени

Минимальный момент инерции уголка определится по формуле

$$J_{\min} = \frac{J_{x0} + J_{y0}}{2} - \sqrt{\frac{(J_{x0} - J_{y0})^2}{4} + J_{xy0}^2}, \quad (3.10)$$

где  $J_{x0}$ ,  $J_{y0}$ ,  $J_{xy0}$  – моменты инерции относительно центральных осей  $X_0$  и  $Y_0$  в некоторый момент времени. Положение центральных осей определится аналогично предыдущему случаю:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{S_y}{A} \\ y_0 = \frac{S_x}{A} \end{cases}, \quad (3.11)$$

где

$$A = (H + B) \cdot D - D^2 \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} S_x = \frac{B^2 \cdot D + D^2 \cdot (H - D)}{2} \\ S_y = \frac{H^2 \cdot D + D^2 \cdot (B - D)}{2} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$P = 2 \cdot (H + B), \quad (3.14)$$

Значения моментов инерции относительно осей  $X$  и  $Y$  определяются по формулам:

$$\begin{cases} J_x = H^3 \cdot D + D^3 \cdot (B - D) \\ J_y = B^3 \cdot D + D^3 \cdot (H - D) \\ J_{xy} = [H^2 + B^2 - D^2] \cdot D^2 \end{cases} \quad (3.15)$$

Относительно центральных осей те же моменты определяются следующим образом:

$$\begin{cases} J_{x0} = J_x - 2 \cdot y_0 \cdot S_x + y_0^2 \cdot A \\ J_{y0} = J_y - 2 \cdot x_0 \cdot S_y + x_0^2 \cdot A \\ J_{xy0} = J_{xy} - y_0 \cdot S_x - x_0 \cdot S_y + x_0 \cdot y_0 \cdot A \end{cases} \quad (3.16)$$

В формулах (3.1) – (3.16) значения  $B$ ,  $H$ ,  $D$ ,  $T$ , а, следовательно, и всех геометрических характеристик сечений, зависят от глубины коррозионного поражения в элементе  $\delta = \delta(t)$ . Изменения геометрических размеров во времени для всех сечений определяются следующим образом:

$$\begin{cases} H(t) = H^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ B(t) = B^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ D(t) = D^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ T(t) = T^0 - 2 \cdot \delta(t) \end{cases} \quad (3.17)$$

Поскольку толщина стойки  $D$  в произвольный момент времени известна из соотношений (3.17), это позволяет учесть для швеллера и двутавра третий тип активных ограничений – ограничения по сплошности сечения, связанные с возможностью полной коррозии стойки.

Таким образом, для основных типов стандартных прокатных профилей построены модели корродирующих сечений и предложены формулы для вычисления их основных геометрических характеристик как функций глубины коррозионного поражения  $\delta(t)$ . Их преимущества заключаются в небольшом количестве входных параметров и возможности представления основных характеристик в относительно простом аналитическом виде.

Недостатком описанных моделей является то, что, как отмечалось в главе 1, при внешнем подобии модельного и реального профилей, модельные профили не учитывают ряд параметров реальных профилей: радиусы скругления, углы наклона полок. Если просто переносить размеры реального профиля на модельный профиль, то параметры (площадь, периметр, момент инерции) будут значительно отличаться. Таким образом, недостатком описанных моделей является отсутствие методик подбора коэффициентов соответствия модельных и реальных сечений стержневых элементов стандартных профилей.

Из этого следует, что погрешность расчётов заложена уже на начальном этапе вычислений. Этот факт для двутаврового профиля показан в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Сравнение геометрических характеристик  
реального и модельного сечений**

| №<br>профиля | <i>B</i> | <i>H</i> | <i>D</i> | <i>T</i> | <i>R</i> <sub>2</sub> | <i>R</i> <sub>1</sub> | <i>A</i> <sub>табл</sub> | <i>A</i> <sub>мод</sub> | <i>J</i> <sub>табл</sub> | <i>J</i> <sub>мод</sub> | $\varepsilon_A$ | $\varepsilon_J$ |
|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
|              | см       |          |          |          |                       |                       | см <sup>2</sup>          |                         | см <sup>4</sup>          |                         | %               |                 |
| 10           | 5,5      | 10,0     | 0,45     | 0,72     | 0,7                   | 0,25                  | 12,0                     | 11,77                   | 17,9                     | 20,03                   | 1,9             | 11,90           |
| 14           | 7,3      | 14,0     | 0,49     | 0,75     | 8,0                   | 0,30                  | 17,4                     | 17,07                   | 41,9                     | 48,75                   | 1,9             | 16,35           |
| 18           | 9,0      | 18,0     | 0,51     | 0,81     | 0,90                  | 0,35                  | 23,4                     | 22,93                   | 82,6                     | 98,60                   | 2,0             | 19,37           |
| 22           | 11,0     | 22,0     | 0,54     | 0,87     | 1,00                  | 0,40                  | 30,6                     | 30,08                   | 157,0                    | 193,26                  | 1,7             | 23,09           |
| 27           | 12,5     | 27,0     | 0,60     | 0,98     | 1,10                  | 0,45                  | 40,2                     | 39,52                   | 260,0                    | 319,46                  | 1,7             | 22,87           |
| 30           | 13,5     | 30,0     | 0,65     | 1,02     | 1,20                  | 0,50                  | 46,5                     | 45,71                   | 337,0                    | 418,90                  | 1,7             | 24,30           |

Таким образом, несмотря на то, что данные модели просты в использовании и удовлетворяют всем четырем требованиям к моделям корродирующих сечений стержней, изготовленных из стандартных профилей, описанным ранее, они не позволяют адекватно описать коррозионный процесс в элементах ШСК. Их использование при моделировании поведения корродирующих ШСК приведет к большим погрешностям.

### 3.2 Описание уточнённых моделей корродирующих сечений

С помощью алгоритма, основанного на аппроксимации криволинейного контура сечения ломаной линией, описанного в [73], построим уточнённые модели корродирующих сечений и определим изменение основных характеристик профилей с течением времени.

Для удобства вычислений рассмотрим двутавровое сечение как совокупность пяти фрагментов: четырех одинаковых фрагментов, один из которых изображен на рисунке 3.5, и одного прямоугольного фрагмента. Представим двутавровое сечение в виде совокупности треугольных фрагментов (рис. 3.6)

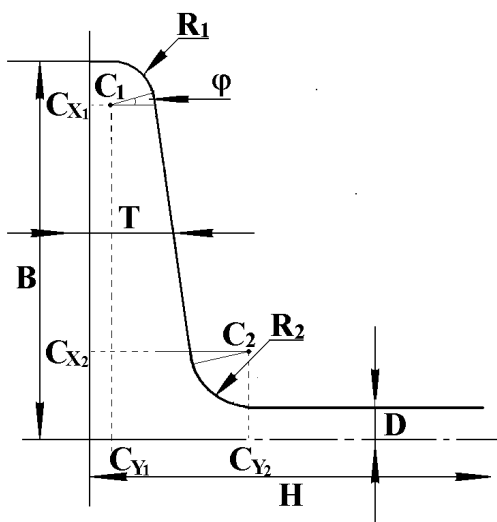


Рис. 3.5 – Параметры реального двутаврового сечения

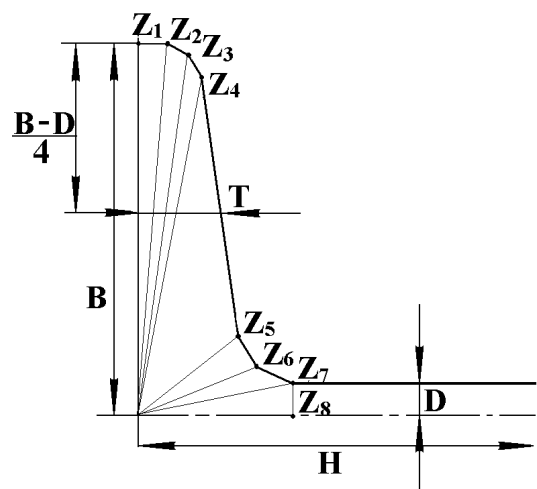


Рис. 3.6 – Модель сечения в виде совокупности треугольных фрагментов

На первом этапе определяются координаты точек излома контура. Положение точек на плоскости, в которой расположено сечение, определяется в правой декартовой системе координат  $(x, y)$ . Точки излома контура последовательно нумеруются, начиная с любой и двигаясь вдоль контура, так, чтобы материал сечения оставался справа. В результате на аппроксимирующем контуре получим  $N+1$  точек с координатами  $(x_j, y_j)$  ( $j=1, \dots, N, N+1$ ).

Координаты точек на контуре сечения определяются через параметры реального сечения (рис. 3.5).

Центры окружностей  $C_1$  и  $C_2$  имеют координаты:

$$Cx_1 = \frac{B}{2} - R_1; \quad Cy_1 = T - R_1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \left( \frac{B-D}{4} - R_1 \right) \quad (3.18)$$

$$Cx_2 = \frac{D}{2} + R_2; \quad Cy_2 = T + R_2 + \operatorname{tg} \alpha \cdot \left( \frac{B-D}{4} - R_2 \right) \quad (3.19)$$

Значения координат точек контура приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

**Координаты точек контура элемента двутаврового сечения**

| № точки | x   | y   | № точки | X   | y   |
|---------|---|---|---------|---|---|
| $Z_1$   | $Cx_1 + R_1$                              | 0   | $Z_5$   | $Cx_2 - R_2 \cdot \cos \varphi$           | $Cy_2 - R_2 \cdot \sin \varphi$           |
| $Z_2$   | $Cx_1 + R_1$                              | $Cy_1$                                    | $Z_6$   | $Cx_2 - R_2 \cdot \cos \frac{\varphi}{2}$ | $Cy_2 - R_2 \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$ |
| $Z_3$   | $Cx_1 + R_1 \cdot \cos \frac{\varphi}{2}$ | $Cy_1 + R_1 \cdot \sin \frac{\varphi}{2}$ | $Z_7$   | $Cx_2 - R_2$                              | $Cy_2$                                    |
| $Z_4$   | $Cx_1 + R_1 \cdot \cos \varphi$           | $Cy_1 + R_1 \cdot \sin \varphi$           | $Z_8$   | 0   | $Cy_2$                                    |

Здесь  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha$ .

На следующем этапе вычисляются площадь  $A_i$ , момент инерции  $J_{y_i}$  треугольного фрагмента и расстояние между соседними точками  $d_i$ :

$$A_i = |Zx_i * Zy_{i+1} - Zx_{i+1} * Zy_i|, \quad i = \overline{1, 7}; \quad (3.20)$$

$$d_i = \sqrt{(Zx_{i+1} - Zx_i)^2 + (Zy_{i+1} - Zy_i)^2}, \quad i = \overline{1, 7}; \quad (3.21)$$

$$J_{yi} = \frac{1}{12} (Zx_i^2 + Zx_i \cdot Zx_{i+1} + Zx_{i+1}^2) \cdot A_i, \quad i = \overline{1, 7}. \quad (3.22)$$

Характеристики двутаврового сечения в целом определяются следующим образом:

$$A = 4 \cdot \sum_{i=1}^7 A_i + D \cdot (H - 2 \cdot Cy_2) \quad (3.23)$$

$$P = 4 \cdot \sum_{i=1}^7 d_i + 2 \cdot (H - 2 \cdot Cy_2) + 2 \cdot B \quad (3.24)$$

$$J_y = 4 \cdot \sum_{i=1}^7 J_{yi} + \frac{D^3 \cdot (H - 2 \cdot Cy_2)}{12} \quad (3.25)$$

Процесс коррозии моделируется путём изменения радиусов на величину  $\delta(t)$  и пересчёта координат точек контура.

$$\begin{cases} R_1(\delta) = R_1^0 - \delta \\ R_2(\delta) = R_2^0 + \delta \\ Z_i = Z_i(R_1, R_2) \end{cases} \quad (3.26)$$

Выбор такого количества точек контура, а именно  $N = 8$ , обоснован полученными результатами при решении задачи, моделирования процесса коррозии представленными в таблице 3.3.

Таблица 3.3

**Сравнение характеристик реального и модельного сечений в начальный момент времени**

| № профиля | $A, \text{см}^2$ | $A_m, \text{см}^2$ | $\varepsilon_A, \%$ | $J, \text{см}^4$ | $J_m, \text{см}^4$ | $\varepsilon_J, \%$ |
|-----------|------------------|--------------------|---------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 10        | 12,0             | 12,03              | 0,25                | 17,9             | 17,87              | 0,17                |
| 12        | 14,7             | 14,76              | 0,40                | 27,9             | 27,85              | 0,18                |
| 14        | 17,4             | 17,46              | 0,34                | 41,9             | 42,11              | 0,50                |
| 16        | 20,2             | 20,29              | 0,44                | 58,6             | 58,34              | 0,44                |



В начальный момент времени площадь и момент инерции практически совпадают с табличными значениями, представленными в ГОСТе. Следовательно, увеличение количества точек на контуре не принесёт значительных изменений при решении задачи.

Сечение швеллера рассмотрим как совокупность трёх фрагментов: двух одинаковых фрагментов, один из которых изображен на рисунке 4.6, и одного прямоугольного фрагмента. Сечение швеллера, аналогично двутавровому сечению, представляется в виде совокупности треугольных фрагментов (рис 3.5).

Швеллер, в отличие от двутавра имеет одну ось симметрии. Положение центральной оси определится в соответствии с (3.6). Выражение для статического момента треугольного фрагмента имеет вид:

$$S_{y_i} = (Zx_i + Zx_{i+1}) \cdot A_i, \quad i = \overline{1, 8}. \quad (3.27)$$

Статический момент швеллера в целом определяется следующим образом:

$$S_y = \sum_{i=1}^7 S_{y_i} + \frac{(H - 2 \cdot Cy_2) \cdot D^2}{2} \quad (3.28)$$

Значение момента инерции относительно центральной оси определяется аналогично (3.9) и имеет следующий вид:

$$J_y = 4 \cdot \sum_{i=1}^7 J_{y_i} + \frac{D^3 \cdot (H - 2 \cdot Cy_2)}{12} - y_0 \cdot A \quad (3.29)$$

Процесс коррозии моделируется, как и для двутавра, путём изменения радиусов на величину  $\delta(t)$  и пересчёта координат точек контура в соответствие с (3.26).

Сечение неравнополочного уголка представлено на рисунке 3.7. На рисунке 3.8 представлена модель сечения неравнополочного уголка в виде совокупности треугольных фрагментов.

Значения координат точек излома контура приведены в таблице 3.4.

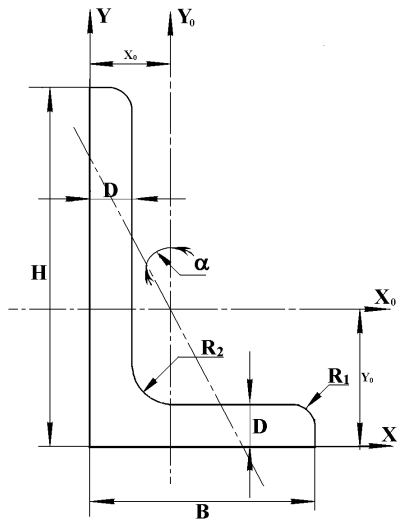


Рис. 3.7 – Реальное сечение  
неравнополочного уголка

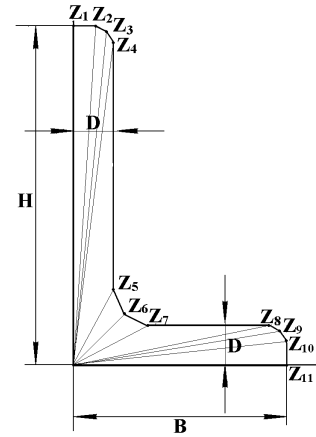


Рис. 3.8 – Модель сечения  
неравнополочного уголка в виде  
совокупности треугольных  
фрагментов

Таблица 3.4

**Значения координат точек излома контура уголкового сечения**

| № точки  | $x$                                      | $y$                                      |
|----------|--|--|
| $Z_1$    | 0  | $H$                                      |
| $Z_2$    | $D - R_1$                                | $H$                                      |
| $Z_3$    | $D - R_1 + R_1 \cdot \sin \frac{\pi}{4}$ | $H - R_1 + R_1 \cdot \sin \frac{\pi}{4}$ |
| $Z_4$    | $D$                                      | $H - R_1$                                |
| $Z_5$    | $D$                                      | $D + R_2$                                |
| $Z_6$    | $D + R_2 - R_2 \cdot \sin \frac{\pi}{4}$ | $D + R_2 - R_2 \cdot \sin \frac{\pi}{4}$ |
| $Z_7$    | $D + R_2$                                | $D$                                      |
| $Z_8$    | $B - R_1$                                | $D$                                      |
| $Z_9$    | $B - R_1 + R_1 \cdot \sin \frac{\pi}{4}$ | $D - R_1 + R_1 \cdot \sin \frac{\pi}{4}$ |
| $Z_{10}$ | $B$                                      | $D - R_1$                                |
| $Z_{11}$ | $B$                                      | 0  |

Площадь  $A_i$  и расстояние между соседними точками  $d_i$  вычисляется по формулам (3.20) и (3.21).

Моменты инерции  $J_{y_i}$ ,  $J_{x_i}$ ,  $J_{xy_i}$  статические моменты инерции  $S_{x_i}$ ,  $S_{y_i}$ , центры тяжести  $Y_0$ ,  $X_0$  треугольника вычисляются по следующим формулам:

$$J_{y_i} = (Zx_i^2 + Zx_i \cdot Zx_{i+1} + Zx_{i+1}^2) \cdot A_i, \quad (3.30)$$

$$J_{x_i} = (Zy_i^2 + Zy_i \cdot Zy_{i+1} + Zy_{i+1}^2) \cdot A_i$$

$$J_{xy_i} = (Zx_{i+1} \cdot Zy_i + 2 \cdot Zx_i \cdot Zy_i + 2 \cdot Zx_{i+1} \cdot Zy_{i+1} + Zx_i \cdot Zy_{i+1}) \cdot A_i, \quad (3.31)$$

$$S_{x_i} = (Zx_i + Zx_{i+1}) \cdot A_i, \quad S_{y_i} = (Zy_i + Zy_{i+1}) \cdot A_i, \quad (3.32)$$

$$Y_0 = (Zx_i + Zx_{i+1}) \cdot A_i, \quad X_0 = (Zy_i + Zy_{i+1}) \cdot A_i, \quad (3.33)$$

где  $i = \overline{1,10}$ .

Характеристики сечения неравнополочного уголка в целом определяются следующим образом:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{10} A_i \quad (3.34)$$

$$P = H + B + \sum_{i=1}^{10} d_i \quad (3.35)$$

$$S_x = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{10} S_{x_i}, \quad S_y = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{10} S_{y_i} \quad (3.36)$$

Положение центральных осей определяются по (3.11).

Таким образом, данная модель удовлетворяет выдвигаемому требованию – позволяет учитывать изменение во времени положения и ориентации главных осей.

Моменты инерции относительно центральных осей определяются по следующим формулам:

$$J_{y_0} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{10} J_{y_i} - Y_0^2 \cdot A, \quad J_{x_0} = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{10} J_{x_i} - X_0^2 \cdot A \quad (3.37)$$

$$J_{xy_0} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{10} J_{xy_i} - X_0 S_x - Y_0 S_y + X_0 \cdot Y_0 \cdot A \quad (3.38)$$

Минимальный момент инерции уголка определится по формуле (3.10).

Процесс коррозии (накопление геометрических повреждений в сечении) моделируется путём изменения параметров сечения на величину  $\delta(t)$  и пересчёта координат точек контура.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_1(\delta) = R_1^0 - \delta \\ R_2(\delta) = R_2^0 + \delta \\ B = B^0 - 2\delta \\ H = H^0 - 2\delta \\ D = D^0 - 2\delta \\ Z_i = Z_i(R_1, R_2, B, H, D) \end{array} \right. \quad (3.39)$$

Сечение равнополочного уголка может быть рассмотрено, как частный случай неравнополочного уголка. Расчёт основных характеристик сечения производится по тем же формулам, что и для неравнополочного уголка, учитывая, то что  $B = H$ .

Разработанные модели сечений, состоящие из совокупности прямоугольных фрагментов, учитывают все требования, выдвигаемые к моделям корродирующих сечений стержней, изготовленных из стандартных профилей. Их использование позволяет создать адекватную модель коррозионного деформирования корродирующих ШСК. Они, однако, менее удобны в реализации, чем модели, состоящие из совокупности прямоугольных фрагментов. Также для описания сечений различных типов требуется различное количество входных параметров.

В последующих разделах предлагаются модели корродирующих сечений, позволяющие совместить точность одного и удобство другого вида моделей. Для этого предлагается разработать методику определения размеров модельных сечений, состоящих из совокупности прямоугольных фрагментов, таким образом, чтобы коррозионный процесс в них происходил так же, как и в реальных стержневых элементах.

### 3.3 Задача идентификации параметров моделей корродирующих сечений

Сформулируем математическую постановку задачи определения геометрических размеров модельных сечений. В качестве эталонных в данном разделе рассматриваются модели сечений, состоящие из совокупности треугольных фрагментов, наиболее точно описывающие коррозионный процесс в элементах ШСК.

Пусть  $A_R(\bar{x}), P_R(\bar{x}), J_R(\bar{x})$  – площадь, периметр и минимальный момент инерции эталонного сечения, представляющие собой функции вектора геометрических параметров  $\bar{x}$ , а  $A_M(\bar{y}), P_M(\bar{y}), J_M(\bar{y})$  – те же геометрические характеристики некоторой модели сечения, зависящие от вектора параметров  $\bar{y}$ .

Модель сечения должна адекватно описывать процесс коррозии в нём, то есть изменение во времени вышеперечисленных характеристик. Предположим, данное условие выполняется при единственном значении вектора  $\bar{y} = \bar{y}^*$ . Задача идентификации параметров модели корродирующего сечения заключается в нахождении такого вектора  $\bar{y}^*$ .

Первые три условия определяют равенство данных характеристик в начальный момент времени:

$$A_R^0(\bar{x}) = A_M^0(\bar{y}); P_R^0(\bar{x}) = P_M^0(\bar{y}); J_R^0(\bar{x}) = J_M^0(\bar{y}). \quad (3.40)$$

Эти характеристики должны совпадать в произвольный момент времени, следовательно, должно быть соблюдено равенство их производных во времени:

$$\frac{dA_R^0(\bar{x})}{dt} = \frac{dA_M^0(\bar{y})}{dt}; \frac{dP_R^0(\bar{x})}{dt} = \frac{dP_M^0(\bar{y})}{dt}; \frac{dJ_R^0(\bar{x})}{dt} = \frac{dJ_M^0(\bar{y})}{dt}. \quad (3.41)$$

Итак, имеет место система, состоящая из шести уравнений. В то же время модель сечений двутавра и швеллера содержат четыре параметра. Очевидно, в этом случае решения данной системы не существует.

Необходимо или увеличить количество параметров моделей сечений, что нежелательно, или обоснованно уменьшить количество уравнений.

Значения периметров сечений позволяют определить площадь сечения через параметр  $\delta$ :

$$A(\delta) = A^0 - P^0 \delta + s_k \delta^2, \quad (3.42)$$

где  $s_k$  - коэффициент формы сечения ( $\pi < S_k < 4$ ).

С другой стороны, из (3.42), если продифференцировать обе части выражения по времени, следует, что

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dA}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = (-P^0 + 2 \cdot s_k \delta) \cdot \frac{d\delta}{dt}. \quad (3.43)$$

При выполнении первых двух условий (3.43), значения производных функций площадей по времени будут совпадать с точностью до  $2 \cdot \delta \cdot s_k$ . С учётом того, что  $\delta \ll P^0$  и значения  $s_1$  и  $s_2$  достаточно близки, можно считать, что выполнение данных условий приведёт к выполнению четвёртого условия системы.

Таким образом, имеем систему четырёх уравнений следующего вида:

$$\begin{cases} A_R^0(\bar{x}) = A_M^0(\bar{y}) \\ P_R^0(\bar{x}) = P_M^0(\bar{y}) \\ J_R^0(\bar{x}) = J_M^0(\bar{y}) \\ \frac{dJ_R(\bar{x})}{dt} = \frac{dJ_M(\bar{y})}{dt} \end{cases} \quad (3.44)$$

В системе (3.44) значения вектора  $\bar{x}$  известны.

Данная система может быть решена для моделей сечения двутавра и швеллера. Существующие модели уголков, однако, нуждаются в адаптации, так как содержат, в отличие от моделей двутавра и швеллера, только три (неравнополочный уголок) и два (равнополочный уголок) параметра.

Эквивалентное сечение неравнополочного уголка должно удовлетворять условиям (3.44). Модель сечения, изображённая на рисунке 3.3 и описанная в 3.1, не может удовлетворить эти условия, так как содержит только три параметра.

Необходимо ввести четвертый параметр. Дополним сечение уголка квадратным фрагментом со стороны  $T^0$  (рис 3.9).

При этом периметр сечения не меняется и вычисляется по формуле (3.14). Площадь сечения и моменты инерции вычисляются по формулам (3.10) – (3.16) с учетом дополнительного фрагмента.

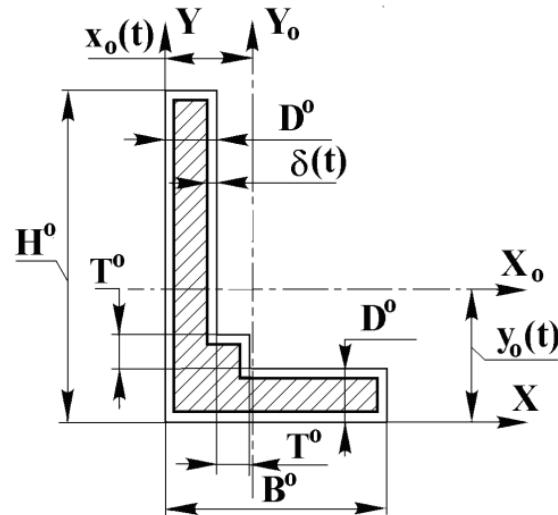


Рис. 3.9 – Поперечное сечение адаптированного неравнополочного уголкового профиля в произвольный момент времени

Изменения геометрических размеров во времени определяются следующим образом:

$$\begin{cases} H(t) = H^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ B(t) = B^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ D(t) = D^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ T(t) = T^0 \end{cases} \quad (3.45)$$

Модель равнополочного уголка содержит два параметра, по аналогии с неравнополочным уголком, не удовлетворяет условиям (3.44). В связи с этим необходимо дополнить существующую модель двумя параметрами (рис. 3.10).

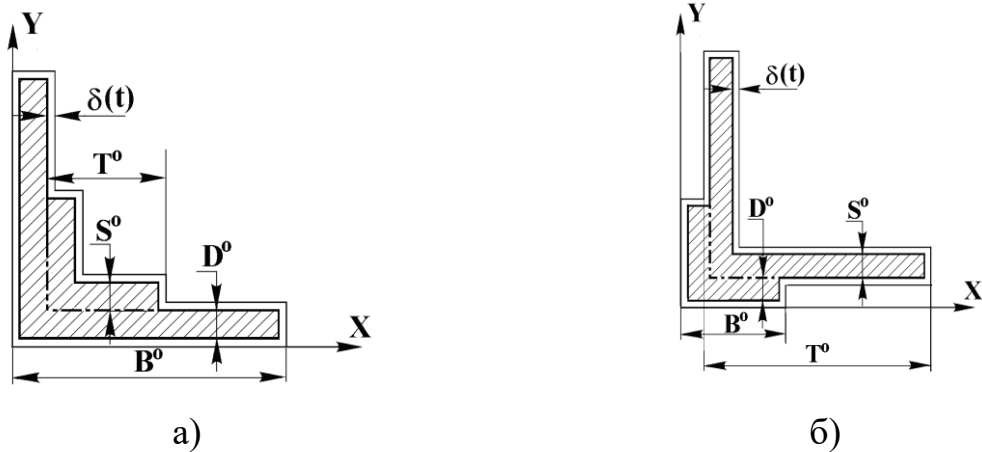


Рис. 3.10 – Адаптированные поперечные сечения равнополочного уголкового профиля в произвольный момент времени

Представим адаптированный равнополочный уголок как два совмещённых уголка рис 3.9 а, 3.9 б. Однозначно определить вид адаптированного сечения можно будет после проведения численного эксперимента.

Параметры уголка могут изменяться в следующих пределах:

$$T, B \in [0; B_R], S, D \in [0; D_R]. \quad (3.46)$$

Для модели, представленной на рисунке (3.9 а), процесс коррозии моделируется следующим образом:

$$\begin{cases} B(t) = B^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ D(t) = D^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ T(t) = T^0 \\ S(t) = S^0 \end{cases} \quad (3.47)$$

Для модели, представленной на рисунке (3.9 б):

$$\begin{cases} B(t) = B^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ D(t) = D^0 \\ T(t) = T^0 - 2 \cdot \delta(t) \\ S(t) = S^0 - 2 \cdot \delta(t) \end{cases} \quad (3.48)$$

Минимальные моменты инерции уголковых профилей относительно главных осей определяются так же, как и для ранее описанных моделей уголков с учётом добавленных фрагментов.



Параметры моделируемых сечений любого из рассмотренных ранее типов могут быть получены из решения системы нелинейных уравнений (3.44). При этом только функции первых двух уравнений легко выражаются через неизвестные  $y_i$ . Выражения для моментов инерции уголка, а тем более его производной по времени, представляются в виде вычислительных алгоритмов. Поэтому непосредственное применение известных численных методов решения систем нелинейных уравнений (метода итераций, метода Ньютона) не представляется возможным.

Предлагается искать решение, минимизируя сумму квадратов невязок, то есть функцию вида:

$$F(\bar{y}) = \left(1 - \frac{P_M^0(\bar{y})}{P_R^0}\right)^2 + \left(1 - \frac{A_M^0(\bar{y})}{A_R^0}\right)^2 + \left(1 - \frac{J_M^0(\bar{y})}{J_R^0}\right)^2 + \left(1 - \frac{J_{Mt}'(\bar{y})}{J_R^0}\right)^2 \rightarrow \min \quad (3.49)$$

Таким образом, решение исходной системы сводится к нахождению решению задачи безусловной оптимизации функции четырёх переменных.

Задача решалась методом случайного поиска. Результаты решения оптимизационной задачи для двутаврового профиля представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5

**Результаты решения оптимизационной задачи для стержневого элемента двутаврового сечения**

| № профиля | $H_M$ , см | $B_M$ , см | $D_M$ , см | $T_M$ , см |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 10        | 9,24512    | 5,33578    | 0,59829    | 0,69663    |
| 14        | 13,04495   | 7,09369    | 0,65732    | 0,69604    |
| 18        | 16,85726   | 8,74981    | 0,69547    | 0,73148    |
| 22        | 20,65596   | 10,70202   | 0,75599    | 0,76205    |
| 30        | 28,33864   | 13,13080   | 0,88473    | 0,88298    |

Результаты сравнения геометрических характеристик эталонного и модельного сечений двутаврового профиля № 10 (100×55×4,5×7,2) во времени приведены в таблице 3.6 для  $v_0 = 0,1$  см/год,  $k = 0,003$  МПа<sup>-1</sup>.

Таблица 3.6

**Результаты сравнения геометрических характеристик эталонного  
и модельного сечений двутаврового профиля**

| $t$ , лет | $A_E$ , см <sup>2</sup> | $A_M$ , см <sup>2</sup> | $\varepsilon_A$ , % | $J_E$ , см <sup>4</sup> | $J_M$ , см <sup>4</sup> | $\varepsilon_J$ , % |
|-----------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 0,0000    | 12,133                  | 12,132                  | 0,0                 | 17,78                   | 17,78                   | 0,0                 |
| 0,4145    | 10,250                  | 10,232                  | 0,2                 | 14,45                   | 14,39                   | 0,4                 |
| 0,8290    | 8,327                   | 8,290                   | 0,4                 | 11,30                   | 11,23                   | 0,6                 |
| 1,2435    | 6,333                   | 6,274                   | 0,9                 | 8,30                    | 8,24                    | 0,7                 |
| 1,6580    | 4,192                   | 4,175                   | 1,0                 | 5,37                    | 5,37                    | 0,0                 |

В таблице 3.7 представлены численные результаты решения той же модельной задачи, но модельные значения характеристик получены с помощью переноса размеров профиля, приведенных в нормативных документах, на модельный.

*Таблица 3.7*

**Изменение геометрических характеристик стержневого элемента  
при переносе размеров реального профиля на модельный**

| $t$ , лет | $A_E$ , см <sup>2</sup> | $A_M$ , см <sup>2</sup> | $\varepsilon_A$ , % | $J_E$ , см <sup>4</sup> | $J_M$ , см <sup>4</sup> | $\varepsilon_J$ , % |
|-----------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 0,0000    | 12,133                  | 11,772                  | 3,0                 | 17,78                   | 20,03                   | 12,7                |
| 0,4145    | 10,250                  | 9,738                   | 5,0                 | 14,45                   | 16,32                   | 12,9                |
| 0,8290    | 8,327                   | 7,646                   | 8,2                 | 11,30                   | 12,82                   | 13,5                |
| 1,2435    | 6,333                   | 5,446                   | 14,0                | 8,30                    | 9,48                    | 14,2                |
| 1,6580    | 4,192                   | 2,988                   | 28,7                | 5,37                    | 6,13                    | 14,2                |

Из приведённых данных видно, что относительная погрешность вычислений значительно выше, чем для параметров, приведенных в табл. 3.5.

Проанализируем результаты численного эксперимента для полученных оптимальных параметров адаптированных уголкового профиля.

Результаты сравнения геометрических характеристик реального и модельного сечений во времени приведены в таблице 3.8 для  $v_0 = 0,1$  см/год,  $k = 0,003$  МПа<sup>-1</sup>. Параметры модельного сечения неравнополочного уголка 80×55×5, полученные в результате решения задачи оптимизации следующие:  $H_R = 7,70563$  см;  $B_R = 4,97994$  см;  $D_R = 0,50453$  см;  $T_R = 0,49878$  см.

Таблица 3.8

**Результаты сравнения геометрических характеристик реального и модельного сечений неравнополочного уголкового профиля**

| $t$ , лет | $A_R$ , см <sup>2</sup> | $A_M$ , см <sup>2</sup> | $\varepsilon_A$ , % | $J_R$ , см <sup>4</sup> | $J_M$ , см <sup>4</sup> | $\varepsilon_J$ , % |
|-----------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| 0,0000    | 6,395                   | 6,395                   | 0,0                 | 7,567                   | 7,567                   | 0,0                 |
| 0,2950    | 5,514                   | 5,509                   | 0,1                 | 6,425                   | 6,415                   | 0,2                 |
| 0,5901    | 4,618                   | 4,608                   | 0,2                 | 5,304                   | 5,288                   | 0,3                 |
| 0,8851    | 3,698                   | 3,684                   | 0,4                 | 4,192                   | 4,172                   | 0,5                 |
| 1,1802    | 2,734                   | 2,715                   | 0,7                 | 3,063                   | 3,042                   | 0,7                 |
| 1,4752    | 1,676                   | 1,651                   | 1,5                 | 1,844                   | 1,833                   | 0,6                 |

Сравнивая полученные результаты можно сделать вывод, что относительная погрешность основных характеристик сечения не превосходит 1,5 %.

В результате решения задачи идентификации параметров модельного сечения равнополочного уголка было установлено, что полученная модель имеет вид, представленный на рисунке 3.9б.

Полученные данные подтверждают адекватность разработанных моделей. Модели такого вида удовлетворяют требованиям, выдвигающимся к моделям корродирующих сечений реальных профилей, точны, просты в использовании и требуют одинакового количества входных параметров для любого из четырех типов профилей.

### **3.4 Усовершенствованная модель коррозионного деформирования шарнирно-стержневых конструкций**

Как указывалось ранее, разработанные модели корродирующих сечений являются составляющей частью модели коррозионного деформирования шарнирно-стержневой конструкции в целом. Площади сечений, полученные при помощи данных моделей, необходимы для определения компонентов матрицы жесткости конечного элемента:

$$K = \frac{EA(t)}{L} \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha \\ \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha \\ -\cos^2 \alpha & -\cos \alpha \sin \alpha & \cos^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \\ -\cos \alpha \sin \alpha & -\sin^2 \alpha & \cos \alpha \sin \alpha & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (3.50)$$

где  $E$ ,  $A$ ,  $L$ ,  $\alpha$  – модуль упругости, площадь сечения, длина и угол наклона стержневого элемента.

Минимальные моменты инерции сечений необходим для вычисления критического напряжения, при котором происходит потеря устойчивости стержня, по формуле Эйлера:

$$\sigma^*(t) = \frac{\pi^2 EJ_{\min}(t)}{L^2 A(t)}. \quad (3.51)$$

Позволяя вычислять площади и моменты инерции корродирующих сечений с удовлетворительной точностью, разработанные модели сечений позволяют также и адекватно моделировать процесс коррозионного деформирования, то есть, изменения во времени деформаций и напряжений в элементах шарнирно-стержневых конструкций.

С использованием полученных моделей корродирующих сечений реальных профилей была решена задача долговечности корродирующих ШСК. В качестве объекта исследований рассматривалась пятиэлементная ШСК, приведенная на рисунке 3.11.

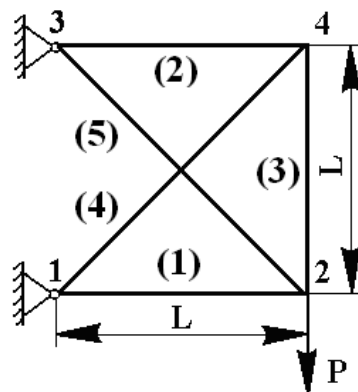


Рис. 3.11 – Расчетная схема пятистержневой ШСК

В таблице 3.9 приведены изменения текущих и критических напряжений в элементах конструкции в процессе решения задачи.

Таблица 3.9

**Изменение напряжений в элементах ШСК**

| <i>t</i> ,<br>лет | Элемент 1           |                       | Элемент 2           |                       | Элемент 3           |                       | Элемент 4           |                       | Элемент 5           |                       |
|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
|                   | $\sigma_1$ ,<br>МПа | $\sigma_1^*$ ,<br>МПа | $\sigma_2$ ,<br>МПа | $\sigma_2^*$ ,<br>МПа | $\sigma_3$ ,<br>МПа | $\sigma_3^*$ ,<br>МПа | $\sigma_4$ ,<br>МПа | $\sigma_4^*$ ,<br>МПа | $\sigma_5$ ,<br>МПа | $\sigma_5^*$ ,<br>МПа |
| 0,0               | 364,1               | 1661,1                | 343,4               | 2400,0                | 343,2               | 2400,0                | 354,6               | 960,5                 | 515,8               | 2400,0                |
| 0,5               | 425,0               | 1645,9                | 403,5               | 2400,0                | 403,3               | 2400,0                | 416,0               | 952,4                 | 606,7               | 2400,0                |
| 1,0               | 511,0               | 1630,7                | 490,3               | 2400,0                | 490,0               | 2400,0                | 504,7               | 944,2                 | 739,2               | 2400,0                |
| 1,5               | 642,8               | 1615,1                | 628,8               | 2400,0                | 628,3               | 2400,0                | 646,1               | 935,8                 | 952,9               | 2400,0                |
| 2,0               | 888,3               | 1598,2                | 911,5               | 2400,0                | 910,3               | 2400,0                | 934,9               | 926,7                 | 1400,8              | 2400,0                |

Таким образом, разработанные модели корродирующих сечений позволяют моделировать процесс коррозионного деформирования элементов шарнирно-стержневых конструкций.

**Выводы по главе 3**

1. Разработаны новые модели корродирующих сечений стандартных профилей, позволяющие с высокой точностью определять геометрические характеристики сечений в процессе коррозии.

2. Решена задача идентификации параметров моделей сечений, состоящих из совокупности прямоугольных фрагментов, с целью обеспечения условия их адекватности сечениям реальных профилей. Для модельных прокатных профилей всех типов определены параметры сечений.

3. Проведено усовершенствование модели коррозионного деформирования шарнирно-стержневых конструкций путем включения в нее новых моделей корродирующих сечений.

## ГЛАВА 4

### УПРАВЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЬЮ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ФУНКЦИЙ ОГРАНИЧЕНИЙ

В четвертой главе диссертационной работы предлагается постановка задачи управления погрешностью численного решения систем дифференциальных уравнений (СДУ), которые описывают коррозионный износ в элементах шарнирно-стержневой конструкции (ШСК), эксплуатирующейся в условиях агрессивной среды. Для решения данной задачи предлагается метод, основанный на назначении рациональных параметров численного решения в зависимости от параметров ШСК, параметров агрессивной среды и предельно допустимой погрешности решения. Проводится анализ факторов, влияющих на выбор параметров численных процедур.

Разработан новый метод управления погрешностью решения СДУ с использованием искусственных нейронных сетей, позволяющий определить рациональный параметр вычислительной процедуры (расстояние между узловыми точками на интервале изменения времени). Данный метод может быть использован при вычислении функций ограничений в задаче оптимального проектирования корродирующих конструкций.

Материал данной главы основан на работах автора [16, 17, 124].

#### **4.1 Постановка задачи управления погрешностью решения систем дифференциальных уравнений**

Анализ проблемных аспектов моделирования поведения корродирующих конструкций, приведенный ранее в главе 2, показал, что существующие методы оказываются ненадёжными и малоэффективными при решении поставленных задач.

Существующие модели и численные методы решения систем дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозионного деформирования элементов конструкции, позволяют получить некоторое число, принимаемое за решение задачи, однако не позволяют ответить на вопрос, какова точность этого решения. Для количественной оценки точности решения задачи необходимо иметь некоторое эталонное решение, полученное аналитически или численно, но с контролируемой погрешностью.

Если СДУ, моделирующая коррозионный износ в элементах ШСК, выступает в качестве функции ограничений при решении задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций, проблема погрешности получаемого результата становится особенно актуальной, так как при решении задачи оптимизации приходится обрабатывать десятки, а иногда и сотни тысяч точек в пространстве решений. При этом, если не существует никаких рекомендаций по выбору рациональных параметров численного алгоритма при решении СДУ, невозможно быть уверенным в том, что погрешность полученного решения окажется удовлетворительной. Назначение же таких параметров, которые с высокой достоверностью будут обеспечивать заданную точность на всем пространстве решений, приведет к чрезмерным вычислительным затратам.

Для снижения вычислительных затрат при решении задачи оптимального проектирования корродирующих ШСК, по мнению автора, перспективным представляется подход, который заключается в том, что допустимая погрешность является убывающей функцией итерации решений оптимизационной задачи. На начальных итерациях она может быть достаточно высокой, в результате чего вычислительные затраты минимальны, а в окрестности экстремума погрешность не превышает величины, заданной заказчиком. Реализация такого подхода предполагает наличие алгоритма управления погрешностью, в котором параметром управления является параметр численного решения СДУ.

Задача управления погрешностью численного решения систем дифференциальных уравнений, как показано в обзоре литературных источников, рассматривалась ранее, например, в работах [64, 95], однако существующие методы ее решения обладают рядом значительных недостатков. Основным из них, было то, что в приведенных работах в качестве объектов исследования рассматривались модельные ШСК со стержнями абстрактных сечений. Для конструкций, изготовленных из стержней стандартных профилей (двутавр, швеллер, уголок), полученные ранее рекомендации оказываются неприемлемыми.

Вследствие этого данные методы можно применить только для стержней, работающих на растяжение, в случае, когда разрушение конструкции обусловлено ограничениями по прочности. Для сжатых стержней, когда долговечность конструкции может определяться активными ограничениями по устойчивости, использование обученной таким образом ИНС может привести к существенным ошибкам. Данные методы также невозможно применить для случая, когда разрушение стержневого элемента наступает в результате нарушения сплошности сечения (для двутаврового и швеллерного профилей).

Необходимо создать новый метод управления погрешностью решения СДУ, позволяющую аппроксимировать зависимость между постоянными и варьируемыми параметрами ШСК, состоящих элементов с сечениями реальных прокатных профилей (двутавр, швеллер, уголок), параметрами агрессивной среды, предельно допустимой погрешностью и параметром вычислительной процедуры.

Рассмотрим систему уравнений:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \left[ 1 + k\sigma_i(\bar{x}, \bar{y}, \bar{\delta}) \right]; \delta_i|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N}, \quad (4.1)$$

где  $\delta_i$  - глубина коррозионного поражения в  $i$ -том элементе конструкции,  $v_0$  - скорость коррозии при отсутствии напряжений,  $k$  - коэффициент влияния



напряжений,  $\sigma_i$  - напряжение в  $i$ -том элементе конструкции,  $\bar{x}$  - вектор параметров конструкции,  $\bar{y}$  - вектор параметров агрессивной среды.

Традиционную схему численного решения СДУ такого вида можно представить в виде, приведенном на рис. 4.1. Входными параметрами являются векторы  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , определяющие коэффициенты СДУ, а также параметр численного решения  $h_t$ , задающийся произвольно ввиду отсутствия каких-либо правил его определения.

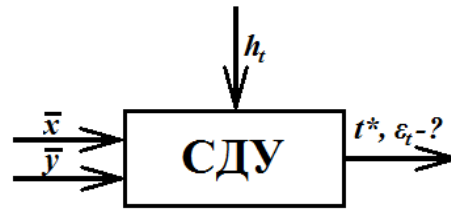


Рис. 4.1 – Традиционная схема численного решения СДУ

Основным требованием к конструкции, которая эксплуатируется в агрессивной среде, является сохранение несущей способности в течение заданного срока эксплуатации. Вопрос о том, какие именно ограничения в момент выхода её из строя окажутся активными, зачастую имеет исключительно теоретический характер. Поэтому для рассматриваемого класса задач под решением СДУ понимается значение долговечности конструкции  $t = t(\bar{x}, \bar{y}, \bar{h})$ .

Тогда погрешность численного решения СДУ будет определяться следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{|t(\bar{x}, \bar{y}, \bar{h}) - t^*|}{t^*}, \quad (4.2)$$

где  $t^*$  - эталонное решение задачи долговечности.

Поскольку численное решение задачи долговечности  $t(\bar{x}, \bar{y}, \bar{h})$  зависит от параметров рассматриваемой конструкции, параметров агрессивной среды

и параметров вычислительной процедуры, то от них будет зависеть и погрешность численного решения СДУ:  $\varepsilon = \varepsilon(\bar{x}, \bar{y}, \bar{h})$ .

Если параметр численного решения остается постоянным, погрешность решения задачи будет меняться при любом изменении векторов параметров конструкции и агрессивной среды, либо возрастая, в результате чего точность решения может оказаться неудовлетворительной, либо уменьшаясь, что приведёт к излишним вычислительным затратам. Контролировать погрешность, а тем более управлять ею при таком подходе невозможно.

Для выполнения поставленной цели получения решения СДУ с заданной точностью необходимо ввести в схему решения задачи модуль управления погрешностью решения (рис. 4.2), позволяющий определять параметр вычислительной процедуры, основываясь на информации о параметрах конструкции, параметрах агрессивной среды и величине допустимой погрешности решения. Иными словами, необходимо построить аппроксимирующую функцию, формализующую данную зависимость.

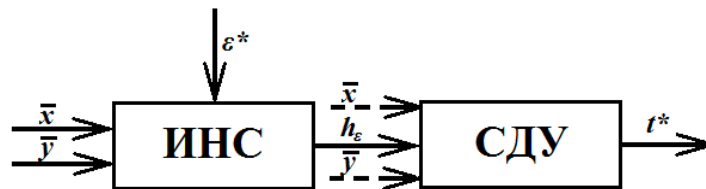


Рис.4.2 – Схема решения СДУ с использованием нейросетевого модуля управления погрешностью (ИНС)

Для построения аппроксимирующей функции необходимо решить следующие частные задачи:

- выбрать алгоритм решения СДУ и параметр управления;
- определить значимые параметры и способ аппроксимации;
- получить коэффициенты аппроксимирующей функции.

Для решения СДУ (4.1) используются, как правило, численные методы типа Рунге-Кутты. Параметром управления, соответственно, будет являться расстояние между узлами временной сетки.

Выбор и обоснование значимых параметров, способа аппроксимации и получение коэффициентов аппроксимирующей функции будут рассмотрены в последующих разделах.

## 4.2 Концепция построения аппроксимирующей функции

Рассмотрим процедуру получения эталонного решения более детально. Под эталонным решением понимается решение, получаемое аналитически (что невозможно осуществить для конструкции в целом) или численно с использованием правила:

$$\lim_{h \rightarrow 0} t(h) = t^*, \quad (4.3)$$

где  $h$  – расстояние между узловыми точками на временном интервале,  $t(n)$  – численное решения, полученное для значения параметра вычислительной процедуры  $h$ ,  $t^*$  – точное значение функции долговечности (в данном случае неизвестное).

Нахождение эталонного решения для заданных векторов параметров конструкции  $\bar{x}$  и параметров агрессивной среды  $\bar{y}$  сводится к получению последовательности приближённых решений при уменьшении расстояния между узловыми точками на временном интервале.

Полученное численно решение  $t(h)$  может считаться эталонным решением, если выполняется следующее условие:

$$|t(h_1) - t(h_2)| < \varepsilon \quad (4.4)$$

Очевидно, что процедура получения эталонных решений для конструкции в целом является громоздкой и неэффективной. Эталонные решения, полученные в таком виде, могут использоваться только для получения количественных оценок погрешности полученных результатов. Использование их для решения сформулированной задачи не имеет смысла.

Для построения аппроксимирующей функции могут использоваться численные решения СДУ, полученные с контролируемой погрешностью.

Множество решений и из погрешности, то есть множество учебных образцов, можно получить, задавая произвольным образом параметры конструкции, параметры агрессивной среды и параметр численного решения СДУ.

Для получения эталонных решений СДУ (4.1) автором предлагается подход, основанный на выполнении следующих условий:

1. Исходная СДУ вида

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 f(\bar{\delta}) \quad (4.5)$$

путём внесения в неё некоторых изменений может быть преобразована в новую систему

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \varphi(\bar{\delta}), \quad (4.6)$$

для которой получить эталонное решение не представляет труда.

2. Погрешности численных решений обеих систем не должны существенно отличаться на заданном множестве значений параметра вычислительной процедуры:

$$\exists h^*: \forall H \leq h^* \Rightarrow |\varepsilon_f - \varepsilon_\varphi| \leq \Delta\varepsilon, \quad (4.7)$$

где  $h^*$  – расстояние между узлами временной сетки,  $\varepsilon_f$  – погрешность численного решения системы (4.5),  $\varepsilon_\varphi$  – погрешность численного решения системы (4.6).

Решения этих систем (4.5) и (4.6) могут, в то же время, отличаться весьма существенно.

На изменение напряжения в стержневом элементе влияют два фактора: уменьшение площади сечения  $A_i$  вследствие коррозии и изменение величины осевого усилия  $Q_i$ . Первый фактор зависит от глубины коррозионного поражения только в данном элементе, второй – от глубины коррозионного поражения во всех элементах конструкции  $\bar{\delta}$ . Тогда систему дифференциальных уравнений (4.1) можно записать в виде:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \left[ 1 + k\sigma_i(A_i(\delta), Q_i(\bar{\delta})) \right]; \delta_i|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N}. \quad (4.8)$$

Если пренебречь изменением во времени величины осевого усилия, система (4.8) превратится в простую совокупность несвязанных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \left[ 1 + k\sigma_i(A_i(\delta_i), Q_i) \right]; \delta_i|_{t=0} = 0; i = \overline{1, N}. \quad (4.9)$$

Для каждого из этих уравнений может быть получено аналитическое решение следующего вида [35]:

$$\begin{aligned} t_i^* &= t_i - \frac{2kQ_i}{v_0 d_i} \ln \left\{ \frac{(P_i + d_i - 2a_i \delta_i)(P_i - d_i)}{(P_i - d_i - 2a_i \delta_i)(P_i + d_i)} \right\}; \\ t_i &= \frac{\delta_i^{\min}}{v_0}; d_i = \sqrt{|4a_i(A_i + kQ_i) - P_i^2|}; \\ t^* &= \min\{t_1^*, t_2^*, t_3^*, \dots, t_N^*\}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $P_i$  - периметр сечения  $i$ -го элемента,  $a_i$ ,  $d_i$  - коэффициенты.

Долговечность всей конструкции, очевидно, будет определяться временем жизни наименее долговечного стержня. Следовательно, первое условие выполнено.

Так как скорость изменения площади сечения значительно выше, чем скорость изменения осевого усилия, что доказано большим объёмом численных экспериментов, то выполняется и второе условие. Таким образом, система (4.9) не может заменить решение системы (4.10) ввиду того, что изменение внутренних усилий может быть весьма значительным, но может использоваться для получения аппроксимирующей функции, которая строится для отдельного стержневого элемента.

### 4.3 Обоснование архитектуры нейронной сети

Цель управления погрешностью численного решения СДУ состоит в том, чтобы при каких-либо изменениях вектора параметров конструкции  $\bar{x}$

или вектора параметров агрессивной среды  $\bar{y}$  в процессе решения задачи происходило переназначение параметра вычислительной процедуры  $h$  таким образом, чтобы погрешность численного решения не превышала предельно допустимого значения:  $\varepsilon(\bar{x}, \bar{y}, h) \leq \varepsilon^*$ .

В предлагаемом автором методе для определения рационального значения параметра численного решения ДУ используется нейронная сеть, аппроксимирующая зависимость вида:

$$F(\bar{x}, \bar{y}, \varepsilon^*, h) = 0. \quad (4.11)$$

Выбор архитектуры нейронной сети, аппроксимирующей функциональную зависимость (4.11) будет определяться, в первую очередь, количеством параметров, от которых будет зависеть погрешность решения СДУ. В данном разделе предлагается анализ влияния различных факторов, на основании которого будет предложена архитектура НС.

Определить долговечность корродирующего стержня можно двумя способами. Наличие аналитической формулы (4.10) позволяет найти эталонное решение – значение времени  $t^*$ , при котором глубина коррозионного поражения достигнет предельного значения:  $\delta(t^*) = \delta^*$ .

Предельное значение  $\delta^*$  определяется из ограничений по прочности, сплошности сечения и устойчивости:

$$\frac{Q}{A(\delta_1)} = [\sigma] \quad (4.12)$$

$$\delta_2 = \eta \cdot D \quad (4.13)$$

$$Q = \frac{\pi^2 EI_{\min}(\delta_3)}{L^2} \quad (4.14)$$

В (4.13)  $D$  - толщина стойки двутавра или швеллера;  $\eta$  - коэффициент ( $\eta < 0,5$ ).

Для первых двух ограничений на результат решения СДУ будут оказывать влияние площадь  $A^0$  и периметр сечения  $P^0$ , скорость коррозии  $\nu$ , величина начального напряжения  $\sigma^0$  и коэффициент влияния напряжения

на скорость коррозии  $k$ . При активном ограничении по устойчивости важными факторами являются также минимальный момент инерции сечения  $J^0$  и длина элемента  $L$ , которая определяет величину критического напряжения  $\sigma_{кр}$  потери устойчивости.

С учётом этого, вектор параметров конструкции может быть представлен в виде:  $\bar{x} = (A^0, P^0, J^0, \sigma^0, \sigma_{кр})$ . Вектор параметров агрессивной среды содержит следующие элементы:  $\bar{y} = (v_0, k)$ .

Площадь, периметр и момент инерции сечения определяются через геометрические размеры сечения. Все размеры элемента, изготовленного из типового прокатного профиля, определяются стандартами. Следовательно, в качестве параметра, содержащего в себе информацию о геометрических характеристиках сечения, можно использовать номер типоразмера стандартного профиля  $N$ . Значение минимального момента инерции сечения  $J^0$  зависит, кроме размеров, от формы сечения. При одних и тех же численных значениях размеров сечения значение  $J^0$  для разных типов сечений будет различным. Различными для каждого типа профиля будут и правила определения других характеристик сечения. Следовательно, матрицы синаптических весов должны быть получены отдельно для каждого типа сечения.

Следующие элементы вектора  $\sigma^0$  и  $\sigma_{кр}$  - начальное и предельное значения напряжения. В качестве  $\sigma_{кр}$  может рассматриваться предел текучести  $[\sigma]$  или предельное напряжение потери устойчивости  $\sigma^*$  (при активных ограничениях по устойчивости).

Степень влияния каждого из элементов векторов параметров конструкции и агрессивной среды на погрешность приближённого решения задачи долговечности определялась следующим образом.

Для начальных значений  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  и параметра  $h$  решалась численно задача долговечности и определялась погрешность численного решения по

формуле (4.2). Изменяя начальные значения одного из элементов  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$ , оценивалось изменение погрешности.

Качественные зависимости погрешности численного решения от изменения параметров задачи приведены на рис. 4.3–4.8.

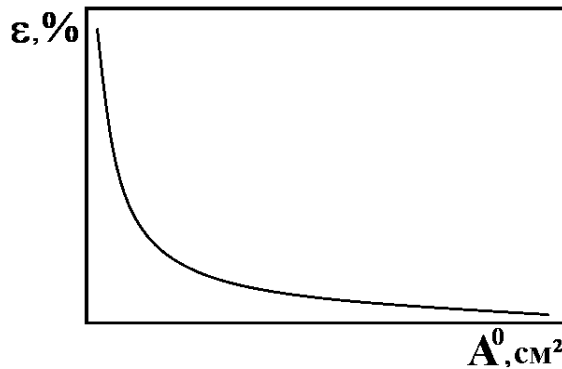


Рис 4.3 – Зависимость погрешности решения от начальной площади сечения

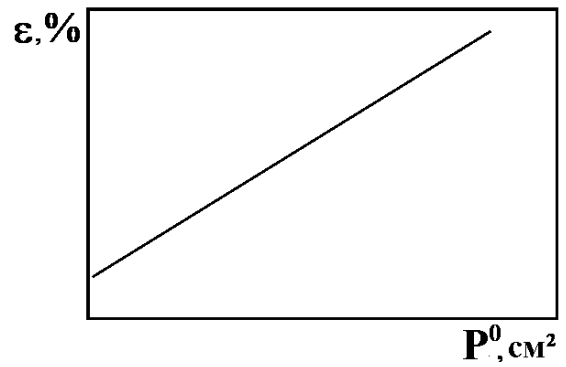


Рис 4.4 – Зависимость погрешности решения от начального периметра сечения

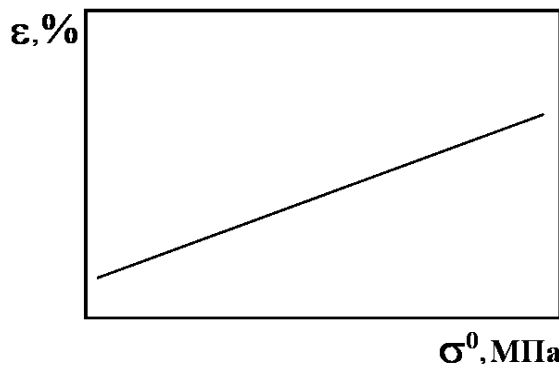


Рис 4.5 – Зависимость погрешности решения от начального напряжения

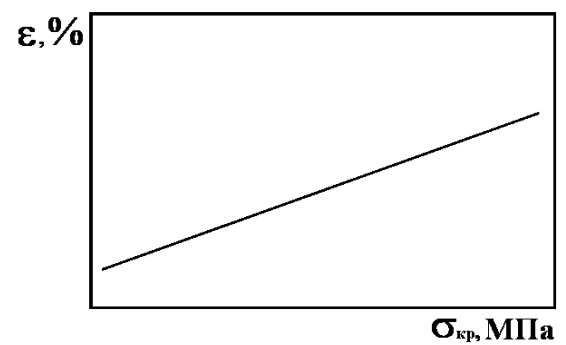


Рис 4.6 – Зависимость погрешности решения от критического напряжения

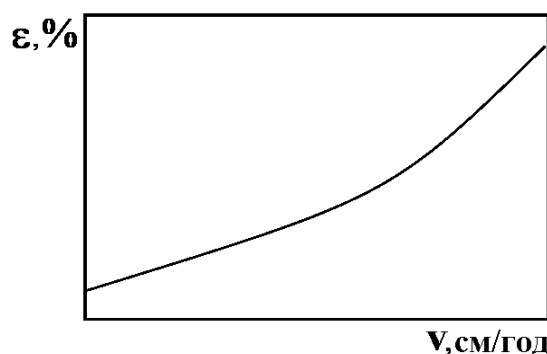


Рис. 4.7 – Зависимость погрешности решения от скорости коррозии

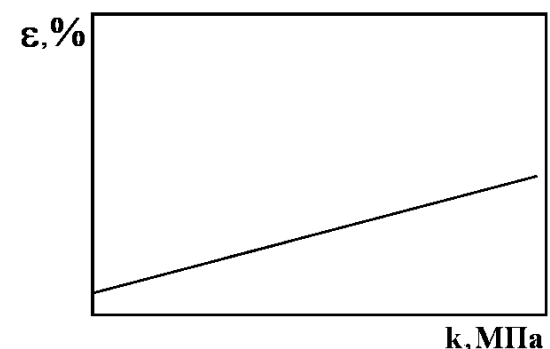


Рис 4.8 – Зависимость погрешности решения от коэффициента влияния напряжений



Увеличение начальной площади сечения приводит, как следует из анализа результатов численного эксперимента, к снижению погрешности численного решения (рис 4.3). Это объясняется, возможно, уменьшением интенсивности роста напряжений во времени, что, в свою очередь, вызвано распределением усилий на большую площадь.

Периметр сечения существенно влияет на динамику изменения напряжений в сечении конструкции. Зависимость погрешности решения от периметра сечения (рис 4.4), имеет практически линейный характер.

Изменение начальных напряжений также влияет на точность решения. Их увеличение приводит к увеличению погрешности (рис. 4.5), причём эта зависимость имеет характер, близкий к линейному.

В качестве критического напряжения при активных ограничениях по прочности, как отмечалось раньше, может приниматься некоторое предельное напряжение, например, предел текучести, значение которого для низкоуглеродистых сталей примерно одинаково и находится в пределах  $[\sigma] \in (220 - 240)$  МПа. В этом случае его можно не принимать во внимание при оценке погрешности решения.

При активных ограничениях по устойчивости долговечность элемента будет определяться критическим напряжением потери устойчивости, которое зависит, в том числе, от минимального момента инерции сечения и длины стержня. При этом начальное значение критического напряжения оказывает существенное влияние на погрешность решения (рис 4.6).

Рассмотрим влияние скорости коррозии на погрешность решения.

При увеличении скорости коррозии происходит увеличение погрешности решения, эта зависимость показана на рис. 4.7.

Значение долговечности корродирующего элемента обратно пропорционально значению  $v_2$ . Следовательно, зная значения долговечности  $t^*$  для какого либо значения  $v$ , можно пересчитать его для любого другого значения  $v$ :

$$t = t^* \cdot \frac{v_1}{v_2}. \quad (4.15)$$

Поэтому достаточно знать значение долговечности для некоторого единственного значения скорости  $v$ , а при её изменении воспользоваться соотношением (4.15).

С другой стороны, в работе [64] показано, что изменение параметров агрессивной среды может привести к изменению не только долговечности конструкции, но и характера её разрушения. Поэтому параметр  $v$  желательно использовать в качестве аргумента аппроксимирующей функции.

В большинстве известных работ коэффициент влияния напряжений на скорость коррозии  $k$  принимался постоянным. В работе [104], однако, приводится обоснование того, что этот коэффициент должен изменяться в процессе решения задач долговечности. Механизм изменения этого коэффициента может быть исследован путём анализа модели Э.М. Гутмана:

$$\frac{d\delta}{dt} = v \cdot \exp \frac{V\sigma}{RT} \quad (4.16)$$

В этой модели мольный объём металла  $V$  и универсальная газовая постоянная  $R$  не могут изменяться в процессе эксплуатации конструкции, в то время как температура  $T$ , как и начальное напряжение в элементе конструкции, могут изменяться. Разложим правую часть уравнения (4.16) в ряд Тейлора и приравняем полученное выражение к правой части модели коррозионного деформирования, которая используется в данной диссертационной работе. В результате получим следующее выражение:

$$1 + k\sigma = \alpha + \frac{\alpha^2 \sigma}{2!} + \frac{\alpha^3 \sigma}{3!} + \dots ,$$

где  $\alpha = \frac{V}{RT}$ .

По этой формуле значение коэффициента  $k$  может быть получено в зависимости от значений напряжения в элементе и температуры среды.

Как видно из рис. 4.8, увеличение коэффициента влияния напряжений на скорость коррозии приводит к увеличению погрешности. Зависимость между ними близка к линейной.

Модель вида (1.7) зачастую используется как самостоятельная модель при заданном значении коэффициента влияния напряжений  $k$ . Поэтому решение о том, рассматривать этот коэффициент в качестве аргумента аппроксимирующей функции или нет, зависит от конкретной ситуации и от решения конкретного исследователя. В данной диссертационной работе коэффициент влияния напряжений не рассматривался в качестве аргумента аппроксимирующей функции.

Из приведенного анализа факторов, влияющих на погрешность численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих поведение корродирующей конструкции, можно сделать следующие выводы:

1. Количество факторов, которые влияют на погрешность решения задачи, зависит от вида активных ограничений, определяющих момент разрушения элемента конструкции. При активных ограничениях по прочности и сплошности сечения значимыми параметрами для построения аппроксимирующей функции являются  $A^0, P^0, \sigma^0, k$ . При активных ограничениях по устойчивости -  $A^0, P^0, J^0, \sigma^0, \sigma^*, k$ . Матрицы синаптических весов должны быть получены для каждого из видов активных ограничений.

2. Поскольку правила определения геометрических характеристик сечения зависят от его типа, то для каждого типа сечения искусственная нейронная сеть должна быть обучена отдельно.

3. Геометрические характеристики сечения (площадь, периметр и момент инерции) зависят от типа и типоразмера сечения. Поэтому в качестве входного параметра ИНС достаточно использовать один параметр – номер типоразмера сечения элемента.

С учётом вышеизложенного, предложена архитектура НС для растянутых и сжатых стержневых элементов, приведенная на рис. 4.9.

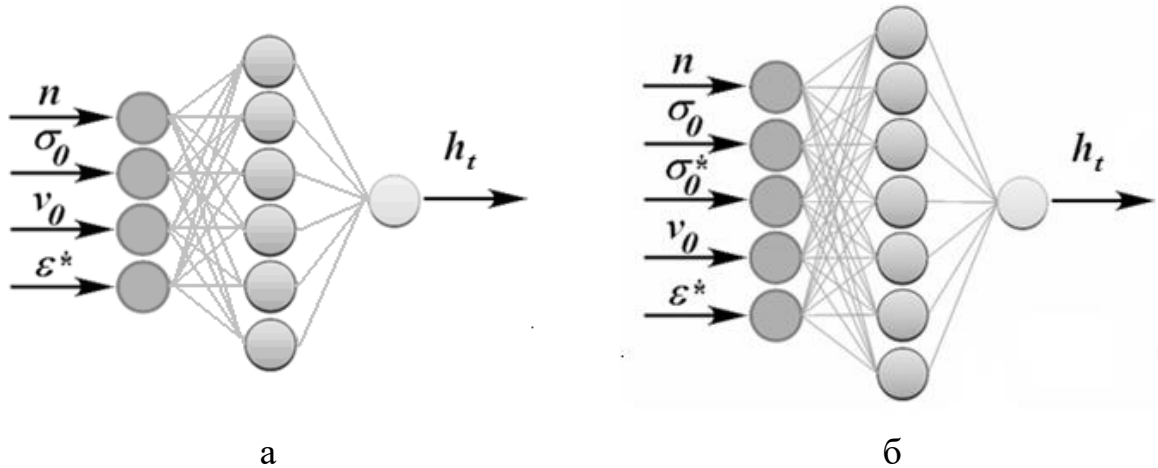


Рис. 4.9 – Архитектура нейронной сети для растянутого (а) и сжатого (б) стержней

На рисунке 4.9 приняты следующие обозначения:  $n$  – нормализованное значение типоразмера профиля,  $\sigma_0$  – величина начального напряжения,  $\sigma_0^*$  – величина критического напряжения,  $\nu_0$  – скорость коррозии при отсутствии напряжений,  $\varepsilon^*$  – предельно допустимое значение погрешности,  $h_t$  – расстояние между узловыми точками на интервале изменения времени.

Количество элементов скрытого слоя выбиралось согласно рекомендациям, приведенным в [60, 66], и на основании численных экспериментов, результаты которых приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

**Зависимость ошибки обучения искусственной нейронной сети от количества элементов скрытого слоя (сжатый стержень)**

| Количество элементов скрытого слоя | Ошибка обучения ИНС |
|------------------------------------|---------------------|
| 5                                  | 0,00139             |
| 6                                  | 0,00054             |
| 7                                  | 0,00016             |
| 8                                  | 0,00016             |

Как показывают вышеприведенные результаты, увеличение количества нейронов в скрытом слое нейронной сети выше семи не приводит к

дальнейшему уменьшению ошибки ее обучения. Аналогично выбиралось количество элементов скрытого слоя для нейронных сетей, работающих с параметрами растянутых стержней.

#### **4.4 Алгоритм получения учебных образцов и обучение искусственной нейронной сети**

Для определения рационального параметра численного решения СДУ на основании информации о геометрических характеристиках сечений стержневых элементах, начальных напряжениях в элементах и скорости коррозии при отсутствии напряжений автором предлагается создание алгоритма, основанного на использовании искусственной нейронной сети. Аппроксимационные модели, создаваемые при помощи нейронных сетей, позволяют получать явные знания из неявных зависимостей и характеризуются простотой и надежностью [83, 100, 121].

Для успешного использования искусственной нейронной сети требуется, как правило, большое число экспериментов. Процесс формирования учебных образцов является важным фактором, влияющим на дальнейшую работу нейросетевого алгоритма. Множество образцов должно обладать наибольшей информационной насыщенностью и минимальной зашумлённостью [9, 67].

Учитывая, что задача долговечности решалась неоднократно, информация о зависимости между параметрами конструкции, параметрами агрессивной среды, параметром вычислительной процедуры и погрешностью численного решения СДУ имеется, но носит рассеянный характер. В данной работе для формализации этих знаний предлагается создать нейросетевой алгоритм, который будет определять параметр вычислительной процедуры, обеспечивающий погрешность численного решения, не превышающую предельно допустимой, для каждого конкретного набора параметров.

Обучающие образцы получаются не для ШСК в целом, а для отдельных стержневых элементов. Такой подход позволяет с одной стороны упростить решение задачи долговечности для учебного образца, а с другой – создать достаточно универсальную нейронную сеть для расчёта шарнирно-стержневых конструкций с произвольной геометрией, граничными условиями и условиями нагружения.

Поскольку в качестве объекта исследования в диссертационной работе рассматриваются ШСК, изготовленные из элементов с сечениями стандартных прокатных профилей, учебные образцы и, в дальнейшем, матрицы синаптических весов были получены отдельно для каждого из четырех типов профилей: двутавр, швеллер, равнополочный и неравнополочный уголок. Также сети обучались отдельно для различных видов активных ограничений: по прочности, по устойчивости и по сплошности сечения (для двутавра и швеллера).

Алгоритм получения обучающей выборки может быть представлен следующей последовательностью действий.

1. На первом этапе получения выборки обучающих образцов происходит генерация входящих параметров решения задачи  $\bar{c} = [n; \sigma_0; [\sigma]; v_0]$ , где  $n$  - номер типоразмера сечения,  $\sigma_0$  - начальное напряжение в элементе,  $[\sigma]$  - критическое напряжение потери устойчивости (для активных ограничений по устойчивости).

Значения вышеперечисленных параметров генерируются таким образом, чтобы они были равномерно распределены на некотором интервале их изменения:

$$\begin{aligned} n_i &= 1 + \text{int}(\alpha_i \cdot m), \\ v_i &= v_i^- + \alpha_i (v_i^+ - v_i^-), \\ \sigma_i^0 &= \sigma_i^- + \alpha_i (\sigma_i^+ - \sigma_i^-), \\ \sigma_{\text{кpi}} &= 1,5 \cdot \sigma_i^0 + \alpha_i \cdot 1,5 \cdot ([\sigma] - \sigma_i^0). \end{aligned} \quad (4.17)$$

Здесь  $m$  - количество типоразмеров профиля,  $\alpha_i$  - случайное число, равномерно распределённое на интервале  $(0; 1)$ .

Также в заданном диапазоне генерируется предельно допустимая погрешность  $[\varepsilon]$ , с которой должно быть получено численное решения задачи для данного учебного образца и параметр численного решения задачи долговечности.

2. Второй этап предполагает получение эталонного решения задачи долговечности для параметров, сгенерированных ранее. В процессе решения задачи долговечности стержня вычисляются его характеристики, проверяется вид активного ограничения, а также предельная глубина коррозии. Эталонное значение долговечности  $t^*_{эм}(\bar{c})$  стержня вычисляется по формуле (4.10).

3. Следующий этап предполагает численное решение дифференциального уравнения и определение погрешности получаемого решения:

$$\varepsilon = \frac{|t^*(\bar{c}, h) - t^*_{эм}(\bar{c})|}{t^*_{эм}(\bar{c})}. \quad (4.18)$$

Если полученная погрешность отличается от предельно допустимой больше чем на некую малую заданную величину ( $||[\varepsilon] - \varepsilon| > \Delta\varepsilon$ ), то параметр численного решения задачи долговечности корректируется. После этого осуществляется повторное численное решение дифференциального уравнения.

Такая процедура повторяется до тех пор, пока не выполняется условие  $||[\varepsilon] - \varepsilon| < \Delta\varepsilon$ . В этом случае формируется очередная строка массива обучающих образцов, содержащая в нормализованном виде элементы вектора  $\bar{c}$ , значение погрешности численного решения и соответствующий параметр вычислительной процедуры  $h$ .

В результате получается обучающая выборка, состоящая из номера типоразмера профиля, величины начального напряжения, величины

критического напряжения (при активных ограничениях по устойчивости), скорости коррозии, величины предельно допустимой погрешности и желаемого выхода сети (расстояния между узлами временной сетки), полученная для конкретного типа профиля.

В дальнейшем искусственные нейронные сети обучались с использованием алгоритма обратного распространения ошибки, подробно описанного, например, в работах [7, 57].

#### **4.5 Анализ результатов численного решения системы дифференциальных уравнений с использованием алгоритма управления погрешностью**

Для тестирования нейросетевого алгоритма управления погрешностью численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих коррозионный износ в элементах конструкции, предлагается решение задачи определения долговечности статически неопределимой, плоской шарнирно-стержневой системы (фермы) из пяти элементов, подвергающейся воздействию агрессивной среды, геометрическая схема и нагрузки которой показаны на рис. 4.10.

Нейронные сети обучались и тестировались для трех видов активных ограничений: по прочности, по устойчивости и по сплошности сечения (для двутавра и швеллера). При этом в каждой из задач были отдельно получены матрицы весовых коэффициентов для каждого из используемых видов профилей.

При тестировании задача управления погрешностью численного решения СДУ решалась для конструкций, долговечность которых составляла от 2,25 до 2,75 года.



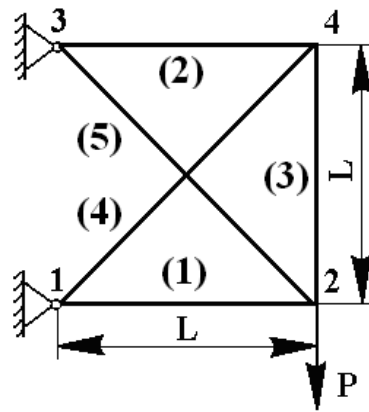


Рис. 4.10 – Расчетная схема пятистержневой ШСК

В табл. 4.2 представлены результаты тестирования алгоритма при активных ограничениях по сплошности сечения (долговечность конструкции  $t^*=2,277$  года).

Таблица 4.2

**Результаты тестирования алгоритма управления погрешностью решения (активные ограничения по сплошности)**

| $\varepsilon^*, \%$ | $\varepsilon, \%$ | $h_i, \text{ лет}$ | $N$ |
|---------------------|-------------------|--------------------|-----|
| 1,0                 | 0,806             | 0,0429             | 56  |
| 2,0                 | 1,812             | 0,0992             | 24  |
| 3,0                 | 3,040             | 0,1784             | 14  |
| 4,0                 | 4,023             | 0,2728             | 10  |
| 5,0                 | 5,286             | 0,3734             | 8   |

Обозначения, принимаемые в табл. 4.1:  $\varepsilon^*$  – заданная погрешность решения задачи;  $\varepsilon$  – полученная погрешность решения задачи;  $h_i$  – расстояние между узлами на интервале изменения времени;  $N$  – количество узловых точек на временном интервале.

В табл. 4.3 и 4.4 приведены результаты тестирования алгоритма при активных ограничениях по прочности (долговечность конструкции  $t^*=2,454$  года) и устойчивости (долговечность конструкции  $t^*=2,463$  года).

Таблица 4.3

**Результаты тестирования алгоритма управления  
погрешностью решения (активные ограничения по прочности)**

| $\varepsilon^*$ , % | $\varepsilon$ , % | $h_t$ , лет | $N$ |
|---------------------|-------------------|-------------|-----|
| 1,0                 | 0,543             | 0,0243      | 103 |
| 2,0                 | 1,681             | 0,0532      | 48  |
| 3,0                 | 2,591             | 0,0996      | 26  |
| 4,0                 | 3,769             | 0,1553      | 17  |
| 5,0                 | 4,783             | 0,2132      | 13  |

Таблица 4.4

**Результаты тестирования алгоритма управления  
погрешностью решения (активные ограничения по устойчивости)**

| $\varepsilon^*$ , % | $\varepsilon$ , % | $h_t$ , лет | $N$ |
|---------------------|-------------------|-------------|-----|
| 1,0                 | 1,015             | 0,1596      | 19  |
| 2,0                 | 2,036             | 0,3597      | 9   |
| 3,0                 | 3,078             | 0,5634      | 6   |
| 4,0                 | 3,742             | 0,7953      | 5   |
| 5,0                 | 4,852             | 1,1664      | 4   |

Некоторые расхождения между требуемыми и фактическими значениями погрешности обуславливаются погрешностью обучения нейронной сети и изменением внутренних усилий в конструкции. Отклонение полученных значений погрешности от заданных, однако, незначительно.

Из приведенных результатов следует, что нейронная сеть позволяет определить расстояние между узловыми точками на интервале изменения времени при численном решении СДУ, описывающей коррозионный процесс, таким образом, чтобы погрешность получаемого решения, соответствовала заданной предельно допустимой погрешности  $\varepsilon^*$ .

## Выводы по главе 4

1. Сформулирована постановка новой задачи управления погрешностью, которая предполагает определение параметра численного решения системы дифференциальных уравнений, позволяющего решить СДУ с заданной точностью и с минимальными вычислительными затратами.

2. Впервые предложен и обоснован метод управления погрешностью решения системы дифференциальных уравнений, описывающей процесс коррозии в элементах конструкции, основанной на использовании искусственных нейронных сетей. Данный метод позволяет аппроксимировать зависимость между коэффициентами системы дифференциальных уравнений, параметром численного решения и параметром получаемого решения.

3. На основании анализа факторов, влияющих на погрешность численного решения ДУ и проведенных численных экспериментов предложена и обоснована архитектура искусственной нейронной сети.

4. Анализ результатов численного решения СДУ, описывающих процесс коррозии в элементах конструкции, демонстрирует, что нейронная сеть позволяет определить расстояние между узлами временной сетки таким образом, чтобы погрешность получаемого решения, соответствовала заданной предельно допустимой погрешности  $\varepsilon^*$ . Использование рационального параметра численного решения, исключающего слишком большое количество узловых точек на временном интервале, существенно повышает эффективность вычислительного метода.

5. Решение проблемы управления погрешностью вычисления функций ограничений делает возможным использование для решения задачи оптимального проектирования ШСК вычислительного метода, основанного на концепции метода скользящего допуска, где критерием скользящего допуска является допустимая погрешность вычисления функций ограничений.

## ГЛАВА 5

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРРОДИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Данная глава посвящена разработке эффективного метода решения задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций, использующего стратегию метода скользящего допуска (МСД).

Как отмечалось в предыдущих главах, высокие вычислительные затраты при вычислении функций ограничений являются одной из особенностей задач данного класса, что делает актуальной проблему их минимизации. Также постановка задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций предполагает получение результата с погрешностью, не превышающей заданной величины. По мнению автора, рассматриваемый метод позволяет решить данные проблемы.

В соответствии со стратегией скользящего допуска, допустимая погрешность является убывающей функцией итерации поиска решений оптимизационной задачи. На начальных итерациях она может быть достаточно высокой, в результате чего вычислительные затраты минимальны, а в окрестности экстремума погрешность не превышает величины, заданной заказчиком. Для реализации данного подхода используется нейросетевая модель управления погрешностью численного решения задачи оптимизации, предложенная в главе 4.

Материалы главы основаны на работах автора [18, 25, 26, 30, 37].

#### **5.1 Обоснование использование метода скользящего допуска к решению задач оптимального проектирования корродирующих конструкций**

Для выполнения одного из условий, которые выдвигаются к вычислительному методу – условия эффективности – необходим анализ

факторов, от которых зависят вычислительные затраты. На них влияет метод решения задачи математического программирования, количество варьируемых параметров, сложность вычисления целевой функции и функции ограничений. Безусловно, основные вычислительные затраты, как указывалось в предыдущих главах диссертационного исследования, приходится на вычисление функций ограничений. Количество итераций при решении задачи оптимизации может достигать десятков и сотен тысяч. На каждой итерации вычисляются функции ограничений. Снизить вычислительные затраты возможно, в частности, при помощи уменьшения количества узлов временной сетки при решении системы дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих коррозионный износ в элементах конструкции.

При решении задачи нелинейного математического программирования с ограничениями сначала осуществляется выход на границу допустимой области, а затем движение вдоль ее границы до достижения точки экстремума. Граница допустимой области в данном случае - множество точек, в которых ограничения в виде равенств выполняются, а ограничения в виде неравенств – становятся строгими равенствами. Точное ее положение, однако, неизвестно, поскольку функции ограничений вычисляются с некоторой погрешностью.

Ранее существовавшие алгоритмы не позволяли контролировать погрешность вычисления функций ограничений при поиске решения оптимизационной задачи. Погрешность решения СДУ, определяющей погрешность вычисления функций ограничений, зависит от параметра численного решения (как отмечалось в главе 4, в данной работе в качестве такого параметра рассматривается расстояние между узлами временной сетки), а, следовательно, от количества обращений к процедуре метода конечных элементов (МКЭ). Результаты численных экспериментов, приведенные в разделе 2.2.2, посвященном анализу проблем, вызываемых сложностью контроля погрешности вычисления функций ограничений,

показали, что при изменении параметра численного решения долговечность проекта, который ранее считался оптимальным, может оказаться меньше, чем заданная, то есть полученное решение не удовлетворяет системе ограничений. Назначение же таких параметров численного решения, которые с приемлемой вероятностью позволят определить долговечность конструкции с погрешностью, не превышающей допустимую, на всем множестве пространства решений приведет к очень высоким вычислительным затратам. Процесс поиска оптимального решения без использования алгоритма управления погрешностью показан на рис. 5.1а.

Представленный в главе 4 метод управления погрешностью вычисления функций ограничений позволяет сократить вычислительные затраты при решении задачи оптимального проектирования корродирующих конструкций. Одновременно, эффективность можно повысить за счет обоснованного выбора метода решения задачи оптимизации. Анализ проблемных аспектов решения данной задачи, приведенный в разделе 2.2, позволяет прийти к выводу, что уменьшить вычислительные затраты можно при помощи рационального выбора параметра численного решения и использования эффективных методов решения задач оптимизации.

Основная идея метода скользящего допуска состоит в том, что на начальном этапе решения задачи нет необходимости в точном вычислении функции ограничений, то есть рассматриваются как допустимые, так и почти допустимые (лежащие вблизи границы допустимой области) точки пространства решений. Такие подходы рассматриваются в работах [356, 74, 97].

По мере движения вдоль границы допустимой области погрешность вычисления функций ограничений снижается таким образом, чтобы в окрестности локального экстремума учитывались только допустимые точки. В этом и заключается стратегия метода скользящего допуска [107]. Алгоритмы данного метода, приведенные в известных автору работах [356, 45, 74, 96], позволяют повысить эффективность численного алгоритма,

однако при отсутствии метода управления погрешностью решения управлять точностью вычисления функции ограничений в процессе поиска решения было невозможно.

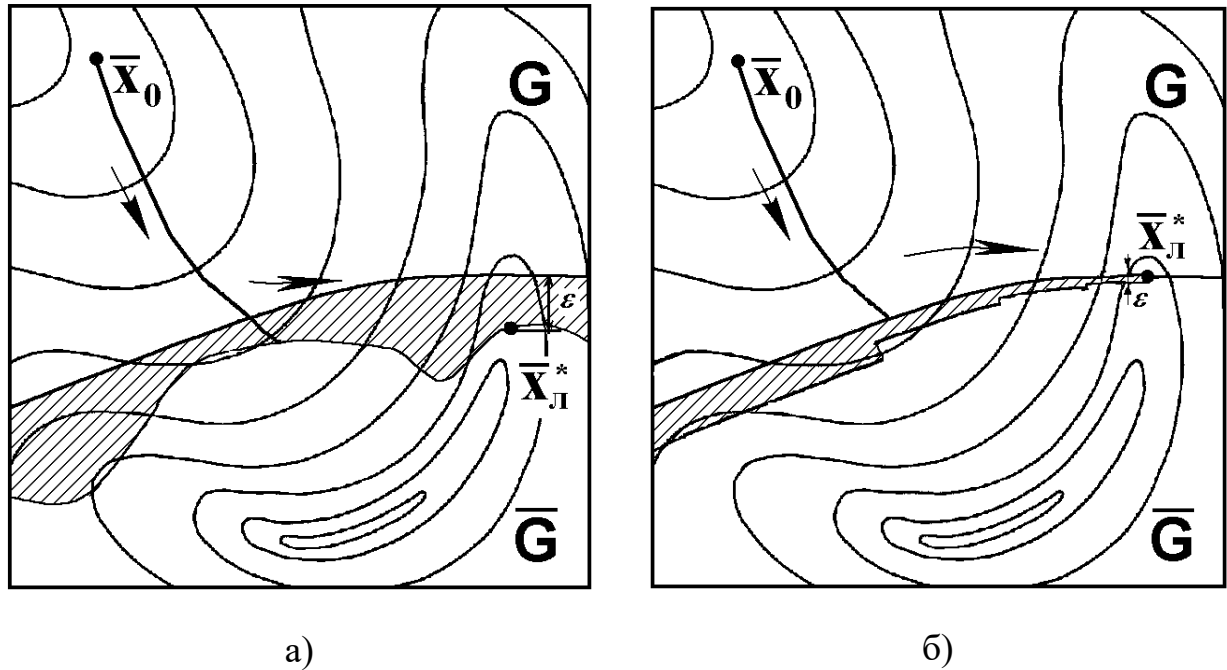


Рис. 5.1 – Процесс поиска оптимального решения без управления (а) и с управлением погрешностью (б) вычисления функций ограничений

В качестве критерия скользящего допуска (КСД) в данной работе предлагается рассматривать погрешность вычисления функций ограничений. Управлять погрешностью ее вычисления позволяет нейросетевой модуль. Погрешность вычисления функций ограничений рассматривается как расстояние до границы допустимой области пространства решений. В процессе решения оптимизационной задачи данное расстояние уменьшается за счет выбора с помощью нейронной сети параметра вычислительной процедуры, обеспечивающего постепенное снижение погрешности (рис. 5.1 б). Исходная задача сводится к виду:

$$X_D : \{\bar{x} \in E^n \mid g_1(\bar{x}) = Y(k) - T(\bar{x}, t^*) \geq 0\}, \quad (5.1)$$

где  $Y$  – критерий скользящего допуска – убывающая функция номера итерации  $k$  при решении задачи нелинейного программирования (НЛП);  $T$  – функционал над всем множеством функций ограничений. В качестве  $Y$

предлагается принять допустимую погрешность вычисления ФО, в качестве  $T$  – относительную погрешность вычисления ФО.

Экстремум целевой функции при данном подходе ищется как в допустимой области  $G$ , так и за её пределами  $\bar{G}$ , на некотором расстоянии от границы, которое сокращается в процессе поиска (рис. 5.1 б). На начальных этапах решения оптимизационной задачи высокая точность вычисления функции ограничений не обязательна. Достаточно, чтобы точки пространства допустимых решений удовлетворяли условию  $x \in [x^* - [\varepsilon]; x^* + [\varepsilon]]$ . Погрешность вычислений функций ограничений, следовательно, может быть достаточно высокой, но контролируемой при помощи ранее рассмотренного нейросетевого модуля. В то же время в окрестности экстремума решения ищутся на границе допустимой области, и погрешность вычислений не превышает некоего малого предельного значения, заранее заданного заказчиком.

Как отмечалось ранее в разделе 2.2, эффективность вычислительного метода зависит от количества обращений к процедуре МКЭ. Исходя из этого, количество итераций при вычислении функций ограничений  $N_2$  можно рассматривать как функцию от предельно допустимой погрешности  $N_2 = N_2([\varepsilon])$ , где  $[\varepsilon] \in [\varepsilon^-; \varepsilon^+]$ ;  $\varepsilon^-$ ,  $\varepsilon^+$  – соответственно минимально и максимально предельно допустимые значения погрешности, заданные заказчиком.

Согласно предлагаемому в данной работе подходу, функции ограничений вычисляются с предельно допустимой погрешностью, которая уменьшается в процессе решения оптимизационной задачи и представляет собой убывающую функцию от номера итерации при решении оптимизационной задачи. При общем числе итераций  $N_1: \lim_{n \rightarrow N_1} \varepsilon = \varepsilon^-$ . Данный подход позволяет получить результат с заданной достаточно высокой точностью и одновременно существенно снизить вычислительные затраты для получения решения за приемлемое время.



## 5.2 Использование генетического алгоритма для решения оптимизационной задачи

Общая схема решения задачи оптимального проектирования корродирующих ШСК с помощью адаптированного МСД показана на рис. 5.2.

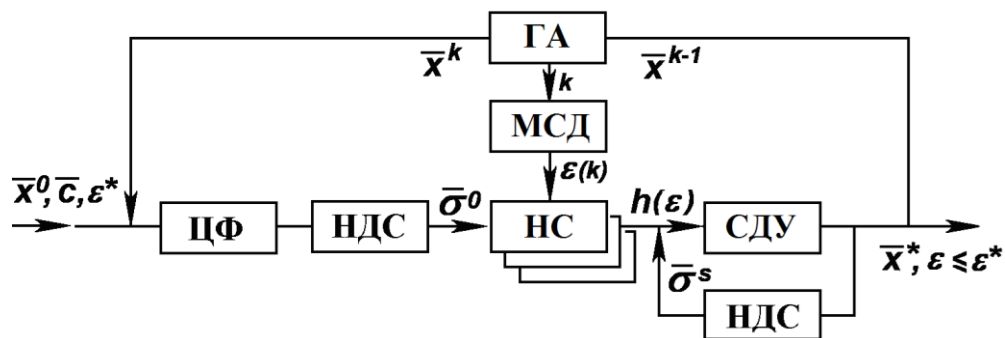


Рис. 5.2 – Схема решения задачи оптимизации ШСК с использованием метода скользящего допуска

На рис. 5.2: ЦФ – модуль вычисления целевой функции; НДС – модуль решения задачи напряженно-деформированного состояния; НС – модуль определения параметров численного решения с помощью ИНС; СДУ – модуль решения системы дифференциальных уравнений, моделирующих процесс коррозии в элементах конструкции; ГА – модуль решения оптимизационной задачи с помощью генетического алгоритма, МСД – модуль метода скользящего допуска.

Для сведения исходной условно-экстремальной оптимизационной задачи (2.2), сформулированной в главе 2, к задаче на безусловный экстремум используется метод штрафных функций:

$$P(\bar{x}) = F(\bar{x}) + H_i \frac{|t(\bar{x}, h_i(\bar{x}, s) - t^*|}{t^*}; \quad H_i = \begin{cases} 0, & \text{если } t \geq t^*, \\ H^*, & \text{если } t < t^*, \end{cases} \quad (5.2)$$

где  $H^*$  – штрафной коэффициент;  $s$  – номер эпохи при решении задачи оптимизации.

Для решения задачи безусловной оптимизации предлагается использовать целочисленный генетический алгоритм. Основные положения построения генетических алгоритмов достаточно полно изложены, например, в [84, 114], поэтому ниже приводятся лишь способы формирования пространства решений и кодирования хромосомы, используемые в данной работе.

Хромосома (аналог вектора варьируемых параметров) представляет собой множество индексов, определяющих положение размеров сечений в трехмерном массиве, где номер слоя (тип сечения) определяется нечётными индексами, номер строки (типоразмер сечения) – чётными. Таким образом, количество генов (аналог варьируемого параметра) в хромосоме равно  $2N$ , где  $N$  – количество стержневых элементов, оптимальные параметры которых требуется определить. На рис. 5.3 и 5.4 показано пространство решений оптимизационной задачи и способ кодирования хромосомы. Всего пространство решений включает в себя 40 возможных стандартных профилей 4 типов и 10 типоразмеров: двутавр (номера профилей 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 33), швеллер (номера профилей 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 33), равнополочный уголок (номера профилей 8, 9, 10, 11, 12.5, 14, 16, 18, 20, 25) и неравнополочный уголок (номера профилей 9, 10, 11, 12.5, 14, 16, 18, 20, 22, 25).

Для описания изменения характеристик сечений во времени используются модели сечений, состоящие из прямоугольных фрагментов, построение которых описывалось в главе 3. Такие сечения, независимо от типа, определяются четырьмя размерами.

Процедура декодирования данных, содержащихся в хромосоме, заключается в извлечении из массива размеров сечений значений, расположенных в том слое и строке, номера которых соответствуют параметрам генов.

Описание моделей эволюции и популяции, используемых при решении задачи, а также реализованных генетических операторов будут приведены ниже в численной иллюстрации.

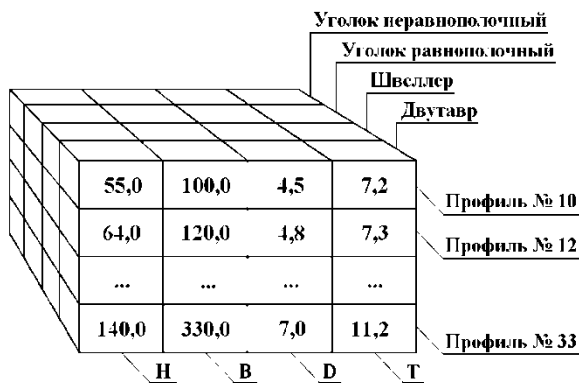


Рис. 5.3 – Пространство решений задачи

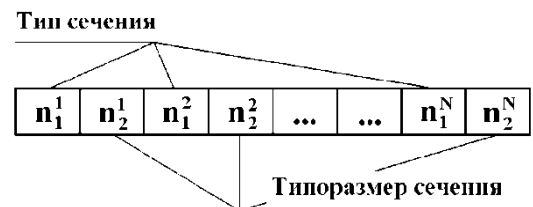


Рис. 5.4 – Пример кодирования хромосомы

В процессе решения задачи, согласно идее метода скользящего допуска, значение критерия скользящего допуска (допустимой погрешности вычисления функций ограничений) должно уменьшаться по мере приближения к экстремуму.

Предлагается уменьшать КСД в зависимости от номера эпохи при работе ГА:

$$Y(k) = \varepsilon_k = \varepsilon_{\max} - \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{n} \cdot \text{int}\left(\frac{k \cdot n}{k_{\max}}\right). \quad (5.3)$$

Здесь  $k_{\max}$  – максимальное количество эпох;  $n$  – количество шагов изменения КСД;  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\varepsilon_{\min}$  – допустимые значения погрешностей на начальном этапе решения задачи и в окрестности экстремума.

Штрафные слагаемые в функции (5.2) будут определяться по формуле:

$$H = H^* \cdot \left( Y(k) - \frac{|t^* - t[\bar{x}, h_i(\bar{x}, Y(k))]|}{t^*} \right), \quad (5.4)$$

где  $h_t$  – параметр численного решения СДУ, зависящий от значений варьируемых параметров и допустимой погрешности на  $k$ -й эпохе при реализации генетического алгоритма.

### 5.3 Численные иллюстрации решения оптимизационных задач

Для иллюстрации предложенного алгоритма рассмотрим решение задачи оптимального проектирования модельных статически неопределимых пяти- и пятнадцатистержневой ферм (рис. 5.5), а также реальной 47-стержневой фермы.

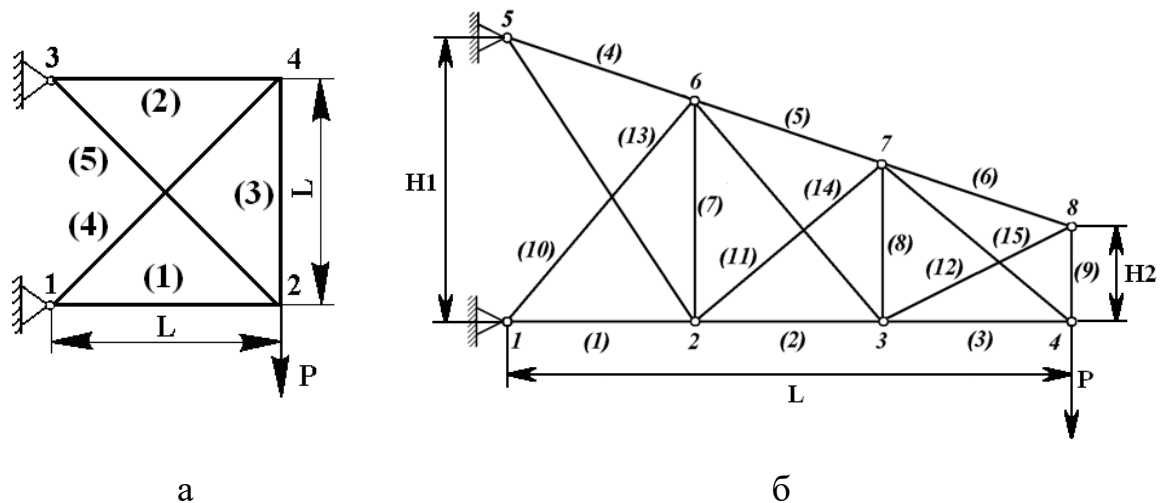


Рис. 5.5 – Расчётные схемы модельных конструкций

#### 5.3.1 Оптимальное проектирование пятистержневой фермы

В первом из рассматриваемых численных экспериментов объектом исследований служила пятистержневая ШСК, показанная на рис. 5.5 а. При тестировании оптимизационного алгоритма использовалась начальная популяция из 250 особей. Конструкция должна была сохранять свою несущую способность не менее, чем 2,5 года.

Задача оптимизации решалась на протяжении 100 эпох или до достижения полного схождения популяции.

При этом, согласно алгоритму метода скользящего допуска, погрешность вычисления функции ограничений снижалась после каждых 20 эпох или при достижении схождения популяции, что позволило снизить вычислительные затраты на ранних этапах оптимизации и получить погрешность численного решения, не превышающую заданной заказчиком допустимой величины, вблизи экстремума. В данном случае, максимальная погрешность вычисления функции ограничений на начальных итерациях поиска составила 5%, минимальная погрешность на последних итерациях - 1%.

В используемом для решения задачи генетическом алгоритме была реализована модель эволюции де Фриза, которая характеризуется высокой вероятностью мутаций [23]. При этом возможность мутации была предусмотрена только для чётных генов, определяющих размер сечения. В алгоритме были использованы одноточечный оператор кроссовера и оператор турнирного отбора.

На рис. 5.6 показано изменение во времени текущих напряжений и критических напряжений потери устойчивости в сжатых стержнях. Для оптимальной конструкции характерно то, что долговечность всех элементов находится в окрестности заданного значения долговечности и не превосходит его более, чем на 7,5 %.

Оптимальные сечения элементов шарнирно-стержневой конструкции, полученные в результате решения задачи, представлены в таблице 5.1.

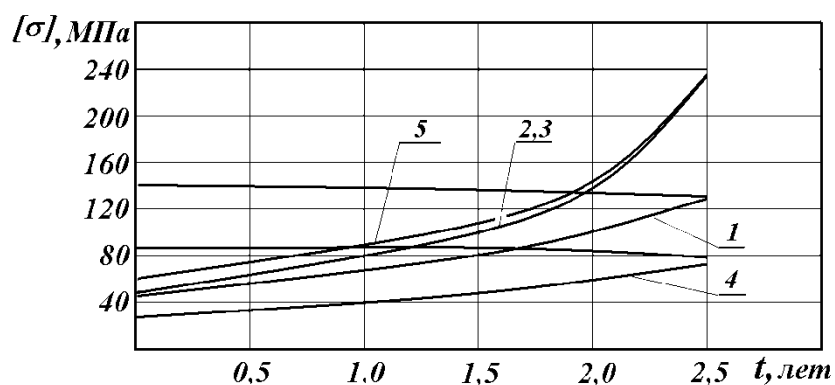


Рис. 5.6 – Изменения напряжений в элементах оптимальной конструкции

Объем полученной конструкции составил 34604,42 см<sup>3</sup>.

Таблица 5.1

**Оптимальные сечения стержней пятиэлементной фермы**

| № | Тип сечения | Типоразмер | $t$ , лет |
|---|-------------|------------|-----------|
| 1 | Уголок      | 125x125x9  | 2,52948   |
| 2 | Уголок      | 125x80x8   | 2,56995   |
| 3 | Уголок      | 125x80x8   | 2,57016   |
| 4 | Уголок      | 140x140x10 | 2,69019   |
| 5 | Уголок      | 125x125x9  | 2,55430   |

В качестве критерия эффективности разработанного метода принималось количество обращений к процедуре метода конечных элементов в процессе поиска оптимального решения. В таблице 5.2 показаны результаты тестирования эффективности алгоритма. В строках таблицы 5.2 приведены данные о количестве решений задачи МКЭ:

- при использовании для вычисления функции ограничений фиксированного шага, обеспечивающего погрешность, не превышающую  $\varepsilon_{\min}$  на всём множестве варьируемых параметров;
- при использовании нейросетевого модуля, рассмотренного в главе 3, для определения расстояния между узлами временной сетки на основании информации о текущих параметрах конструкции, параметрах агрессивной среды и допустимой погрешности  $\varepsilon_{\min}$ ;
- при использовании нейросетевого модуля в сочетании с методом скользящего допуска.

Таблица 5.2

**Анализ эффективности алгоритма**

| Алгоритм  | Количество обращений к МКЭ |
|-----------|----------------------------|
| ГА        | 3 375 508                  |
| НС+ГА     | 1 618 484                  |
| МСД+НС+ГА | 528 043                    |

Результаты численного эксперимента демонстрируют, что вычислительные затраты для алгоритма, использующего адаптированный метод скользящего допуска, примерно в три раза больше, чем для алгоритма, использующего нейросетевой модуль для получения шага, который обеспечивает необходимую точность результата, без уменьшения погрешности в процессе решения задачи. Они также приблизительно в шесть раз меньше, чем вычислительные затраты при использовании генетического алгоритма, в котором для вычисления функции ограничений используется фиксированный шаг, обеспечивающий погрешность, не превышающую  $\varepsilon_{\min}$ . Это подтверждает более высокую эффективность данного метода по сравнению с ранее существовавшими.

### 5.3.2 Оптимальное проектирование пятнадцатистержневой фермы

Во второй из задач, рассматриваемых в данной главе диссертационной работы, объектом исследований является пятистержневая ШСК, приведенная на рис. 5.5б.

Задача оптимального проектирования пятнадцатистержневой ШСК решалась в двух постановках. В первой постановке варьировались сечения всех стержней, во второй стержни объединялись в четыре группы: стержни верхнего пояса, нижнего пояса, стойки и раскосы. Хромосомы состояли из 30 и 8 генов соответственно.

Результаты решения задачи оптимизации в обеих постановках показаны в таблице 5.3. Объёмы оптимальных конструкций составили 54908,86 и 72454,71 см<sup>3</sup>.

Объём конструкции, полученный при решении задачи во второй постановке, существенно превышает объём, полученный при ее решении в первой постановке. Долговечность многих элементов в этом случае может значительно превышать заданную заказчиком. Актуальность данной постановка задачи, однако, обусловлена возможными производственными

ограничениями: сортамент прокатных профилей, доступных на производстве, может быть ограничен, и использование различных типов и типоразмеров профилей для каждого из элементов может быть неэкономично.

Таблица 5.3

**Оптимальные сечения стержней пятнадцатиеlementной фермы**

| Постановка 1 |           |            | Постановка 2 |          |            |
|--------------|-----------|------------|--------------|----------|------------|
| № элем.      | Тип       | Типоразмер | № элем.      | Тип      | Типоразмер |
| 1            | Уголок -2 | 160x100x10 | 1            | Уголок-2 | 180x110x12 |
| 2            | Уголок-1  | 125x125x9  | 2            | Уголок-2 | 180x110x12 |
| 3            | Уголок-1  | 100x100x8  | 3            | Уголок-2 | 180x110x12 |
| 4            | Уголок-2  | 160x100x10 | 4            | Уголок-1 | 140x140x10 |
| 5            | Уголок-2  | 160x100x10 | 5            | Уголок-1 | 140x140x10 |
| 6            | Уголок-2  | 100x63x8   | 6            | Уголок-1 | 140x140x10 |
| 7            | Уголок-2  | 90x56x6    | 7            | Уголок-2 | 100x63x8   |
| 8            | Уголок-2  | 90x56x6    | 8            | Уголок-2 | 100x63x8   |
| 9            | Уголок-2  | 100x63x8   | 9            | Уголок-2 | 100x63x8   |
| 10           | Уголок-1  | 100x100x8  | 10           | Уголок-1 | 110x110x8  |
| 11           | Уголок-1  | 100x100x8  | 11           | Уголок-1 | 110x110x8  |
| 12           | Уголок-1  | 110x110x8  | 12           | Уголок-1 | 110x110x8  |
| 13           | Уголок-2  | 90x56x6    | 13           | Уголок-1 | 110x110x8  |
| 14           | Уголок-2  | 100x63x8   | 14           | Уголок-1 | 110x110x8  |
| 15           | Уголок-2  | 110x70x8   | 15           | Уголок-1 | 110x110x8  |

В таблице 5.4 показано изменение целевой функции для лучшей особи при решении задачи оптимизации во второй постановке.

Таблица 5.4

**Изменение целевой функции при решении задачи оптимизации**

| Номер итерации | Значение погрешности | Значение целевой функции |
|----------------|----------------------|--------------------------|
| 1              | 5%                   | 109988.2                 |
| 2              | 5%                   | 90208.7                  |
| 27             | 4%                   | 68638.7                  |
| 36             | 3%                   | 68638.7                  |
| 37             | 2%                   | 75689.1                  |
| 77             | 1%                   | 72454.7                  |



Возрастание значения целевой функции при уменьшении погрешности с 3% до 2% обусловлено тем, что при более точном вычислении функции ограничений оказывается, что проект, который прежде рассматривался как оптимальный, нарушает ограничения. При оценке точности решения задачи после получения результата, задачу необходимо было бы решать заново с новым параметром численного решения. В то же время, использование нейросетевого алгоритма управления погрешностью для обеспечения заданной погрешности в 1% на всех итерациях решения задачи существенно увеличило бы вычислительные затраты, как это видно из таблицы 5.2.

### 5.3.3 Оптимальное проектирование 47-стержневой фермы

Задача оптимального проектирования решалась для 47-стержневой фермы, прототипом которой являлась кровельная ферма Нижнеднепровского трубопрокатного завода (рис. 5.7).

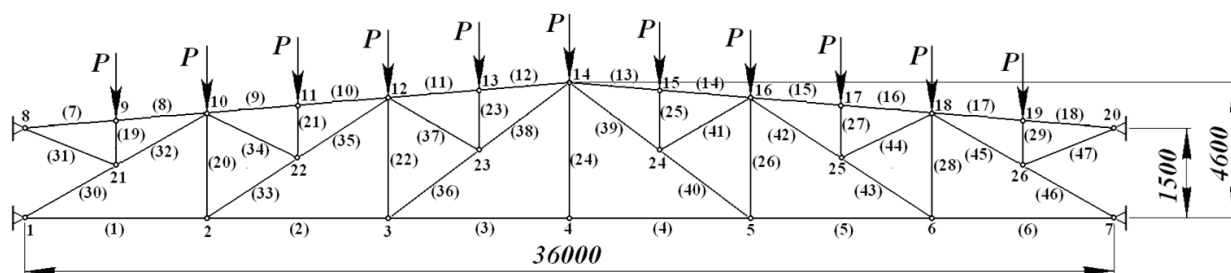


Рис. 5.7 – Расчетная схема кровельной фермы

Как и в случае пятнадцатистержневой ШСК, задача оптимизации решалась в двух постановках. В первом случае в качестве варьируемых параметров выступали группы элементов: элементы верхнего пояса, элементы нижнего пояса, стойки, раскосы и шпренгели. Результаты сравнения исходного проекта и проекта, полученного в результате решения оптимизационной задачи разработанным в диссертационной работе методом, представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

**Сравнение исходного и оптимального проектов для 47-элементной шарнирно-стержневой конструкции**

| № ВП | Элементы                      | Исходный проект | Оптимальный проект |
|------|-------------------------------|-----------------|--------------------|
| 1    | 1-6 (нижний пояс)             | Двутавр 100х200 | Уголок 125х80      |
| 2    | 7-18 (верхний пояс)           | Двутавр 90х180  | Уголок 110х70      |
| 3    | 20,22,24,26,28 (стойки)       | Уголок 90х90    | Уголок 80х50       |
| 4    | 30-47 (раскосы)               | Уголок 125х80   | Уголок 125х80      |
| 5    | 19,21,23,25,27,29 (шпренгели) | Уголок 90х90    | Уголок 80х50       |

Объем исходной конструкции составлял 332475 см<sup>3</sup>. Ее прогнозируемая долговечность равна 13,8 года. При решении оптимизационной задачи долговечность конструкции должна была составлять не менее, чем 15 лет. Объем конструкции, полученной в результате решения оптимизационной задачи, составил 284792 см<sup>3</sup>, а ее долговечность – 15,7 года. Таким образом, снижение металлоемкости в сравнении с исходным проектом составило 14,34%.

Задача также решалась во второй постановке, в которой варьировался каждый элемент конструкции в отдельности. Объем конструкции составил 251312 см<sup>3</sup> при долговечности 15,2 года. Снижение металлоемкости конструкции при решении задачи в данной постановке составило 21,4%.

В таблице 5.6 представлен анализ вычислительных затрат на решение оптимизационной задачи тремя различными методами:

- при использовании для вычисления функции ограничений фиксированного шага, обеспечивающего погрешность, не превышающую  $\varepsilon_{\min}$  на всём множестве варьируемых параметров;

- при использовании нейросетевого модуля, рассмотренного в главе 3, для определения расстояния между узлами временной сетки на основании информации о текущих параметрах конструкции, параметрах агрессивной среды и допустимой погрешности  $\varepsilon_{\min}$ ;

– при использовании нейросетевого модуля в сочетании с методом скользящего допуска.

Задача решалась с использованием процессора Intel® Celeron® CPU E1500 @2,20GHz.

*Таблица 5.6*

**Анализ вычислительных затрат**

| Метод     | Количество обращений к МКЭ | Время решения задачи оптимизации |
|-----------|----------------------------|----------------------------------|
| ГА        | 23 718 241                 | 1 ч 12 мин 45,24 сек             |
| НС+ГА     | 9 804 511                  | 0 ч 34 мин 18,34 сек             |
| МСД+НС+ГА | 4 575 413                  | 0 ч 15 мин 39,11 сек             |

Таким образом, использование в сочетании с генетическим алгоритмом метода скользящего допуска и нейросетевого модуля управления погрешностью решения позволило сократить время решения задачи оптимизации почти в 5 раз.

Использование адаптированного метода скользящего допуска позволяет решить задачу, получив на последних итерациях поиска погрешность, не превышающую заданной, и одновременно получить результат за приемлемое время.

**Выводы по главе 5**

Анализ результатов, полученных в данной главе диссертационной работы, позволяет автору сделать следующие выводы:

1. Предложен новый эффективный метод решения задачи оптимального проектирования корродирующих шарнирно-стержневых конструкций в дискретной постановке на основании генетического алгоритма в сочетании с методом скользящего допуска и нейросетевым модулем управления погрешностью, представленным в главе 3.

2. Благодаря использованию метода управления погрешностью

вычисления функций ограничений оптимизационной задачи впервые получена возможность получения оптимального решения с погрешностью, не превышающей заданной допустимой величины.

3. Использование разработанного метода позволяет частично компенсировать вычислительные затраты, вызванные дискретной постановкой оптимизационной задачи.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача, суть которой заключается в развитии теоретических основ математического и компьютерного моделирования процесса коррозионного деформирования и уменьшения материалоемкости шарнирно-стержневых конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах. Это позволяет сократить срок проектирования, материальные затраты и повысить качество проектирования таких конструкций.

В процессе выполнения работы получены новые научные и практические результаты.

1. Проведен анализ предметной области и определены проблемные аспекты при моделировании процесса коррозионного деформирования ШСК, в частности, проблемы точности численного анализа.

На основании информации о проблемных аспектах решения поставленной задачи разработана новая концептуальная модель определения оптимальных параметров корродирующих шарнирно-стержневых конструкций. Она отличается от существующих тем, что поиск оптимального проекта осуществляется на дискретном множестве решений (множестве индексов), используется усовершенствованная модель процесса коррозионного деформирования и новая модель управления погрешностью вычисления ФО оптимизационной задачи. Данная концептуальная модель позволяет построить метод управляемого по точности численного анализа и оптимального проектирования корродирующих ШСК.

2. Впервые разработан метод управления погрешностью вычисления функций ограничений оптимизационной задачи с использованием искусственных нейронных сетей, что впервые позволило определить параметры вычислительных процедур в процессе решения задачи на основании информации о необходимой точности и параметрах исследуемого объекта. Построена функция, аппроксимирующая зависимость параметров

численного решения СДУ, описывающих коррозионный процесс, от параметров конструкции, агрессивной среды и критерия скользящего допуска.

3. Впервые разработан метод решения оптимизационной задачи на основании генетических алгоритмов и метода скользящего допуска для реализации новой концептуальной модели, который, в отличие от существующих, позволяет изменять в процессе решения задачи погрешность вычисления функций ограничений, что уменьшает вычислительные затраты при одновременном обеспечении заданной точности. На основании результатов численных экспериментов проведен анализ эффективности предложенного вычислительного метода. Результаты анализа демонстрируют, что использование разработанного метода позволило уменьшить вычислительные затраты при решении рассматриваемых задач более чем в пять раз по сравнению с известными.

4. Усовершенствована модель коррозионного деформирования ШСК путем создания новых моделей корродирующих сечений стержневых элементов, что впервые позволило исследовать процесс изменения во времени напряжений в элементах таких конструкций.

5. Полученные результаты использованы в ООО «Днепровская холдинговая компания» при проведении экспертных оценок остаточной несущей способности и разработке новых конструкторских проектов металлоконструкций промышленных зданий с учетом влияния агрессивных сред, а именно:

- уточнении прогнозных оценок запаса несущей способности металлоконструкций с использованием новых моделей корродирующих сечений;

- обоснованием определении сроков и содержания ремонтно-монтажных работ;

- разработке новых конструкторских проектов с использованием оптимизационного алгоритма в смысле определения оптимальных

параметров металлоконструкций по критериям материалоемкости и долговечности.

Результаты исследований были использованы в учебном процессе ДВУЗ УГХТУ при преподавании дисциплин «Математическое моделирование химико-технологических процессов», «Методы эволюционного моделирования», «Нейронные сети», «Методы исследования операций», а также при выполнении дипломных работ специалистов и магистров.

Достоверность основных положений и результатов подтверждается обоснованием и четкостью формулировки математических задач, сравнением полученных результатов с аналитическими и численными результатами других ученых, а также экспертными оценками специалистов во время обсуждения диссертации на научных семинарах и конференциях.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акимов Г. В. Основы учения о коррозии и защите металлов : учебное пособие / Г. В. Акимов. – М. : Metallurgizdat, 1946. – 463 с.
2. Алексеенко Б.Г. Расчёт и оптимальное проектирование рамных систем, подверженных коррозионному износу / Б.Г. Алексеенко // Математические методы в задачах расчёта и проектирования сложных механических систем: Сб. научн. трудов – К., 1992. – С. 4 – 10.
3. Арутюнян Р. А. Вероятностная модель разрушения вследствие питтинговой коррозии. / Арутюнян Р. А. // Пробл. прочности. – 1989. – № 12. – С. 106–108.
4. Баничук Н. В. Введение в оптимизацию конструкций / Н. В. Баничук; отв. ред. В. П. Малков. – М.: Наука, 1986. – 302 с.
5. Батищев Д. И. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации / Д. И. Батищев, Е. А. Неймарк, Н. В. Старостин. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. университет имени Н. И. Лобачевского, 2007. – 85 с.
6. Беруштитс Г. К. Коррозионная устойчивость металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях / Г. К. Беруштитц, Г. Б. Кларк – М.: Наука, 1971. – 160 с.
7. Бодянский Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бадянский, О. Г. Руденко. – Харьков: Телетех, 2004. – 369 с.
8. Болотін О. В. Математичне моделювання в мкробіології та хімічній технології харчових добавок / О. В. Болотін, І. М. Мага, В. В. Нечипорук, В. І. Ткач. – Ужгород: Видавництво В. Падяка, 2014. – 361 с.
9. Бураков М. В. Нейронные сети и нейроконтроллеры / М. В. Бураков. – СПб: Изд-во ГУАП, 2013. – 283 с.
10. Вайнер Р. Эффективное управление точностью численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений и оптимальные интерполяционные равнозначные блочные методы с



переменным шагом / Р. Вайнер, Г. Ю. Куликов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2014. – Том 54, № 4. – С.591–607.

11. Вернигорова В. Н. Коррозия строительных материалов: Монография / В. Н. Вернигорова, Е. В. Королев, А. И. Еремкин, Ю. А. Соколова. – М.: Издательство «Палеотип», 2007. – 176 с.

12. Горбачев К. П. Метод конечных элементов в расчетах прочности / К.П. Горбачев. – Л.: Судостроение, 1985. – 156 с.

13. Губенко В. С. Определение оптимальных параметров и долговечности стержневых систем, подверженных воздействию агрессивной среды / В. С. Губенко, Ю. М. Почтман, Т. М. Криворучко // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура, 1988. – №3 – С.22 – 25.

14. Гутман Э. М. Кинетика механохимического разрушения и долговечность растянутых конструктивных элементов при упругопластических деформациях / Э. М. Гутман, Р. С. Зайнуллин, Р. А. Зарипов // Физико-химическая механика материалов, 1984. – № 2. – с. 14 – 17.

15. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э. М. Гутман. – М.: Металлургия, 1981. – 281 с.

16. Денисюк О. Р. Использование нейронных сетей в численном моделировании поведения корродирующих шарнирно-стержневых конструкций / О. Р. Денисюк // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем: матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 3–5 листопада 2015 р.). – Дніпропетровськ, УДХТУ, 2015. – С. 28–31.

17. Денисюк О. Р. Определение рациональных параметров численного решения систем дифференциальных уравнений / О. Р. Денисюк // Вестник Херсонского национального технического университета. – Херсон, 2016. – №3(58). – С. 208-212.

18. Денисюк О. Р. Оптимальное проектирование корродирующих конструкций с использованием метода скользящего допуска / О. Р. Денисюк,

Д. Г. Зеленцов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 29–31 березня 2016 р.). – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2016. – С. 43.

19. Денисюк О. Р. Способ повышения эффективности вычислительных методов моделирования поведения корродирующих конструкций / О. Р. Денисюк, Д. Г. Зеленцов // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении: сб. научн. тр. – Днепр, ПГАСА, 2016. – Вып. 94 – С. 36–43.

20. Долинский В. М. Изгиб тонких пластин, подверженных коррозионному износу / Долинский В. М. // Динамика и прочность машин. – 1975. – № 21. – С. 16–19.

21. Долинский В. М. Расчёт нагруженных труб, подверженных коррозии / В. М. Долинский // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1967. – № 2. – с. 9 – 10.

22. Долинский В. М. Расчёт элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии / Долинский В. М. // Исследования по теории оболочек. – 1976. – № 7. – С. 37–42.

23. Емельянов В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. Н. Курейчик. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

24. Жмуро О. В. О выборе оптимальных параметров тонкостенной цилиндрической оболочки, подверженной атмосферной коррозии / О. В. Жмуро, Ю. М. Почтман, О. Н. Усова // Работоспособность материалов и элементов конструкций при воздействии агрессивных сред. – Саратов: СПИ, 1986. – С. 61 – 63.

25. Зеленцов Д. Г. Адаптация метода скользящего допуска для решения задач оптимизации корродирующих конструкций / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Інформатика та системні науки (ІСН-2016): матеріали VII

Всеукраїнської науково-практичної конференції за міжнародною участю (м. Полтава, 10–12 берез. 2016 р.). – Полтава: ПУЕТ, 2016. – С. 123–125.

26. Зеленцов Д. Г. Алгоритм решения задач оптимизации корродирующих конструкций на основе метода скользящего допуска / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №2(28). – С. 51–57.

27. Зеленцов Д. Г. Алгоритмы решения систем дифференциальных уравнений в задачах оптимизации корродирующих пластин / Д. Г. Зеленцов, М. В. Мельникова // Системні технології. [Регіональний міжвузівський збірник наукових праць]. – Вип. 5 (55). – Дніпропетровськ, 2007. – С. 95 – 103.

28. Зеленцов Д. Г. Анализ применимости аналитических формул при решении задач долговечности стержневых корродирующих конструкций / Д. Г. Зеленцов, О. А. Радуль, Л. И. Короткая. // Системні технології. [Регіональний міжвузівський збірник наукових праць]. – Вип. 3 (50). – 2007. – С. 121 –129.

29. Зеленцов Д. Г. Анализ применимости аналитической формулы для приближенной оценки долговечности плосконапряженной пластины / Д. Г. Зеленцов, Ю. А. Храпач, Н. Ю. Науменко // Вопросы химии и химической технологии. – 2008. – № 5. – С. 153 – 157.

30. Зеленцов Д. Г. Анализ эффективности алгоритмов на основе метода скользящего допуска в задачах оптимизации корродирующих конструкций / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях. Праці міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 26–31 травня 2016 р.). – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2016. – С. 153–155.

31. Зеленцов Д. Г. Балочный конечный элемент переменной жесткости для расчета конструкций, подверженных коррозионному износу / Д. Г. Зеленцов // Системні технології. [Регіональний міжвузівський збірник наукових праць]. – Вип. 6 (17). – 2001. – С. 64 – 70.

32. Зеленцов Д. Г. Весовая оптимизация плоской фермы, подверженной коррозионному износу / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Проблемы реконструкции и эксплуатации промышленных и гражданских объектов. Сб. трудов Международной конференции. – Днепропетровск, 1999. – С. 15 – 18.

33. Зеленцов Д. Г. Весовая оптимизация статически неопределимой балки при коррозионном износе с использованием конечных элементов переменной жесткости / Д. Г. Зеленцов, Н. А. Солодка // Системні технології. [Регіональний міжвузівський збірник наукових праць]. – Вип. 4 (21). – 2002. – С. 28 – 32.

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

35. Зеленцов Д. Г. Информационное обеспечение расчётов корродирующих объектов. Математические модели и концепция проектирования систем / Д. Г. Зеленцов, О. А. Ляшенко, Н. Ю. Науменко. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012 – 264 с.

36. Зеленцов Д. Г. Использование метода скользящего допуска при решении задач оптимального проектирования конструкций с учётом воздействия агрессивных сред / Д. Г. Зеленцов, Н. Ю. Науменко // Вопросы химии и химической технологии. Научно-технический журнал. – 2003. – № 3. – С. 158 – 162.

37. Зеленцов Д. Г. Использование нейросетевых моделей в алгоритмах оптимизации на основе метода скользящего допуска [Электронный ресурс] / Д. Г. Зеленцов, О. Р. Денисюк // Геоинформационные системы и компьютерные технологии эколого-экономического мониторинга – 2016 (сборник докладов международной научно-технической конференции, 13 – 15 апреля 2016 г.) – Дніпропетровськ: НГУ, 2016. – Режим доступа: [http://gis.dp.ua/conf2016-publications/sections/iad/10\\_zelentzov\\_denisuk.pdf](http://gis.dp.ua/conf2016-publications/sections/iad/10_zelentzov_denisuk.pdf) (дата звернення 01.10.2016). – Назва з екрана.

38. Зеленцов Д. Г. Исследование влияния периметра на оптимальные параметры сечений корродирующих изгибаемых стержневых элементов / Д. Г. Зеленцов, Т. Ю. Ускова // Вопросы химии и химической технологии. – 2004. – № 6. – С. 119 – 122.

39. Зеленцов Д. Г. Математические модели сечений элементов шарнирно-стержневых конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред / Д. Г. Зеленцов, Л. В. Новикова, О. Р. Денисюк // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – №2(53). – С. 146–151.

40. Зеленцов Д. Г. Модели и методы решения задач строительной механики конструкций с изменяющимися геометрическими характеристиками: дис. ... доктора техн. наук: 05.23.17 / Зеленцов Дмитрий Гегемонович – Днепропетровск, 2006. – 317 с.

41. Зеленцов Д. Г. Моделирование процесса коррозионного износа в задачах оптимального проектирования конструкций, использующих метод конечных элементов / Д. Г. Зеленцов, С. В. Кольчик // Компьютерные методы в задачах прикладной математики и механики. Сб. научн. трудов ИК НАН Украины. – К., 1998. – С. 40 – 47.

42. Зеленцов Д. Г. Нейронные сети как средство модификации метода скользящего допуска / Д. Г. Зеленцов, Л. И. Короткая // Восточно-европейский журнал передовых технологий № 4/4 (52). –2011. – С. 21 – 24.

43. Зеленцов Д. Г. Новые конечные элементы переменной жесткости для расчета конструкций, подверженных коррозионному износу / Д. Г. Зеленцов // Сборник научных трудов Национальной горной академии Украины. – Днепропетровск: «Навчальна книга», 2002. - №13. – Т. 2. – С. 169 – 174.

44. Зеленцов Д. Г. Новые модели решения задач весовой оптимизации корродирующих изгибаемых стержневых элементов // Д. Г. Зеленцов, Т. Ю. Ускова. // Системні технології. [Регіональний міжвузівський збірник наукових праць]. – Вип. 1 (42). – Дніпропетровськ, 2006. – С. 23 – 32.

45. Зеленцов Д. Г. Новые численные алгоритмы решения задач оптимизации конструкций, подверженных коррозионному износу / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Modern Building Materials, Structures and Techniques. 6th International Conference. – Vilnius, 1999. – P. 157 – 162.

46. Зеленцов Д. Г. Об одной модели коррозионного разрушения, учитывающей неоднородность электрического потенциала по области конструкции / Д. Г. Зеленцов, Ю. М. Почтман // Докл. АН УССР, сер. А. – 1989. – № 4. – С. 46–49.

47. Зеленцов Д. Г. Об одном алгоритме численного решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений / Д. Г. Зеленцов // Придніпровський науковий вісник. Фізико-математичні науки. – 1998. – № 112(179). – С. 31 – 37.

48. 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. – 2003. – № 2. – С. 146–148.

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

50. Зеленцов Д. Г. Расчёт конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы / Д. Г. Зеленцов. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.

51. Зеленцов Д. Г. Решение задачи долговечности корродирующих конструкций при ограничении на допустимую погрешность / Д. Г. Зеленцов, А. А. Радуль // Металлические конструкции. – 2011. – Том 17, № 1. – С.25–32.

52. 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: Збірн. наук. праць. – Вип. 8. – Дніпропетровськ, 1999. – С. 36 – 42.

53. Зеленцов Д. Г. Уточнение модели с двумя последовательными одноконтурными связями при решении задач весовой оптимизации корродирующих балок / Д. Г. Зеленцов, А. А. Радуль // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 4 (63). – Дніпропетровськ, 2009. – С. 99 – 106.

54. Зеленцов Д. Г. Численные алгоритмы в задаче изгиба корродирующей пластины / Д. Г. Зеленцов, М. В. Мельникова // Вопросы химии и химической технологии. – 2006. – № 4. – С. 186–188.

55. Зеленцов Д. Г. Моделі розв'язання задач оптимізації кородованих багатоеlementних балкових конструкцій / Д. Г. Зеленцов, Т. Ю. Ускова // Промислове будівництво та інженерні споруди [Науково-виробничий журнал]. – 2011. – №3. – С. 30–34.

56. Зеленцов Д. Г. Напіваналітичні алгоритми розв'язання систем диференціальних рівнянь у задачах довговічності кородуючих конструкцій / Д. Г. Зеленцов, Н. Ю. Науменко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – № 4. – С. 14–18.

57. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей: пер. с англ. / Р. Каллан. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 291 с.: ил

58. Карпунин В. Г. Долговечность пластин и оболочек в условиях коррозионного взаимодействия среды / В. Г. Карпунин, С. И. Клещев, М. С. Корнишин // Прочность и долговечность конструкций. – 1980. – С. 34–45.

59. Карпунин В. Г. К расчёту пластин и оболочек с учетом общей коррозии / В. Г. Карпунин, С. И. Клещев, М. С. Корнишин // Труды X Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – Тбилиси: Мецниереба, 1975. – т. 1. – с. 166–174.

60. Колесник И. А. Моделирование коррозионных процессов в стержнях при осевом растяжении и сжатии / И. А. Колесник, Д. Г. Зеленцов,

Ю. А. Храпач // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 1 (9). - Дніпропетровськ, 2000. – С. 49–55.

61. Колесник И. А. Многокритериальная оптимизация стержневых конструкций, подверженных коррозионному износу / И. А. Колесник, Д. Г. Зеленцов, Ю. А. Храпач // Геотехнічна механіка. Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ. – 2002. – Вип. 40. – С.151–156.

62. 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 // Теоретическая механика. – 2002. – № 1. – С. 95–100.

63. Корбут А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

64. Короткая Л. И. Повышение эффективности вычислительных методов моделирования поведения корродирующих конструкций. Диссертация на соискание научн. степени канд техн.наук: 01.05.02 - ГВУЗ «УДХТУ» Днепропетровск, 2012. – 144 с.

65. Коротченко А. Т. О применении метода динамического программирования к оптимальному интегрированию системы дифференциальных уравнений / А. Т. Коротченко // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Всесоюзн. межвуз. сб. / ГГУ. – Горький 1976. – вып. 4. – С.95–97.

66. Круглов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2002. — 382 с.

67. Круглов В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.

68. Лазарев И. Б. Математические методы оптимального проектирования конструкций / И. Б. Лазарев. – Новосибирск: НИИТ, 1974. – 92 с.



69. Малыгин А. Ф. Оценка высокотемпературной солевой коррозии теплоустойчивой стали и жаропрочных никелевых сплавов / А. Ф. Малыгин, А. В. Гуц, Ю. В. Янковский, Е. Е. Ющенко // Физико-химическая механика материалов. – 1982. – № 6. – С. 92–95.

70. Мельников Г. П. Долговечность элементов конструкций в условиях высоких температур и стендовых испытаний / Г. П. Мельников – М.:Атомиздат, 1974. – 232 с.

71. Михалёв А. И. Оптимизация параметров процессов ферросплавного производства с использованием методов нечёткого вывода / А. И. Михалёв, Н. В. Лысая, Д. А. Лысый, В. А. Гладких, В. Ф. Лысенко. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 130 с.

72. Монеткин А. Н. Применение конечно-элементных моделей пониженной точности при проведении оптимизационных расчётов / А. Н. Монеткин // Ползучесть и длительная прочность конструкций. – Куйбышев, 1986. – Вып. 4. – с. 145–151.

73. Мяченков В. И. Расчет составляющих оболочечных конструкций на ЭВМ / В. И. Мяченков, И. В. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1981. – 111 с.

74. Науменко Н. Ю. Адаптированные конечно-элементные модели решения задач строительной механики плосконапряжённых корродирующих пластин: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Науменко Наталья Юрьевна – К., 2008. – 187 с.

75. Никитин В. И. Расчет жаростойкости металлов / В. И. Никитин. – М.: Металлургия, 1976. – 208 с.

76. Новикова Л. В. Методика построения математических моделей корродирующих сечений элементов шарнирно-стержневых систем / Л. В. Новикова, О. Р. Денисюк // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 24–26 березня 2015 р.). – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. – С. 42.

77. Овчинников И. Г. Определение долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / И. Г. Овчинников, В. В. Петров // Строит. механика и расчет сооружений. – 1982. – № 2. – С. 8–10.

78. Овчинников И. Г. Расчет и рациональное проектирование конструкций, подвергающихся коррозионному износу (обзор) / И. Г. Овчинников, Ю. М. Почтман // Физико-химическая механика материалов. – 1991. – № 2. – С. 7–15.

79. Овчинников И. Г. Численное исследование влияния кинетики общей коррозии на напряженное состояние оболочечных элементов конструкций / И. Г. Овчинников, С. И. Трушин, О. В. Мягкова // Математические методы и выч. техника в химическом машиностроении. – М., 1985. – С. 37–41.

80. Овчинников И. Г. Эксплуатационная надёжность и оценка состояния резервуарных конструкций / И. Г. Овчинников, Н. Б. Кудайбергенов, А. А. Шеин. – Саратов: СГТУ, 1999. – 316 с.

81. Огородникова О. М. Расчёт конструкций в ANSYS. Сборник учебных материалов / О. М. Огородникова – М.: Техноцентр компьютерного инжиниринга, 2009. – 452 с.

82. Олевский В. И. Математическое моделирование оболочечных конструкций с отклонениями / В. И. Олевский. – Днепропетровск: Издательство Маковецкий, 2014. – 382 с.

83. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

84. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко. – Астрахань: АГУ, 2007. – 87 с.

85. Пелешко І. Д. Оптимальне проектування металевих конструкцій на сучасному етапі (огляд праць) / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // Металеві конструкції. – 2009. – №1, Т. 15 (2009) – С. 13–21.

86. Пелешко І. Д. Застосування генетичних алгоритмів для пошуку оптимальних проектних рішень металевих конструкцій / І. Д. Пелешко, В. В. Юрченко // VIII Українська научно-технічна конференція «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». Сборник докладов. — Часть 1 / Под ред. Шимановского А. В. — К.: Сталь, 2004. — С. 250–260.

87. Петров В. В. Деформирование элементов конструкций из нелинейного разномодульного неоднородного материала / Петров В. В., Овчинников И. Г., Иноземцев В. К. — Саратов: Сарат. ун-т, 1989. — 159 с.

88. Петров В. В. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В. В. Петров, И. Г. Овчинников, Ю. М. Шихов. — Саратов: Сарат. ун-т, 1987. — 288 с.

89. Пилов П. И. Математическое моделирование и структурно-экстраполяционный анализ в задачах обогащения / П. И. Пилов, А. М. Мильцын, В. И. Олевский. — Днепропетровск: Наука і освіта, 2010. — 174 с.

90. Почтман Ю. М. Некоторые модели задач оптимизации конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / Ю. М. Почтман, Д. Г. Зеленцов // Докл. АН УССР. — сер. А. — 1987. — №12. С. 39–43.

91. Почтман Ю. М. Нелинейная оптимизация тонкостенных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / Ю. М. Почтман // Нелинейная теория тонкостенных конструкций и биомеханика. Труды I Всесоюзн. симпозиума. — Тбилиси, 1985. — С. 382–385.

92. Почтман Ю. М. О постановке задачи оптимального проектирования тонкостенных конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / Ю. М. Почтман, В. Я. Тёмкин // Физико-химическая механика материалов. — 1986. — № 4. — С. 92–95.

93. Почтман Ю. М. Оптимальное проектирование изгибаемых элементов конструкций при комбинированном подходе к учету коррозии и

защитных свойств покрытий / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман // *Theoretical Foundations of Civil Engineering*. – Warsaw, 2000. – P. 518–521.

94. Почтман Ю. М. Расчёт и оптимальное проектирование рамных систем, находящихся в условиях атмосферной коррозии / Ю. М. Почтман, Б. Г. Алексеенко // *Сопротивление материалов и расчёт сооружений*. – Вып. 62. – 1995. – С.137–144.

95. Радуль А. А. Определение долговечности и оптимизация корродирующих конструкций с использованием нейросетевых моделей / дис.... канд. техн. наук: 05.23.17 / Радуль Александр Анатольевич – Днепропетровск, 2012. – 139 с.

96. Радуль О. А. Несущая способность и оптимальное проектирование стержневых конструкций с учётом общей и локальной коррозии: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Радуль Оксана Анатольевна – Днепропетровск, 2009. – 172 с.

97. Радуль О. А. Полуаналитический метод решения систем дифференциальных уравнений в задачах оптимизации корродирующих стержневых конструкций / О. А. Радуль, Н. Ю. Науменко // *Хімія і сучасні технології: III міжн.наук.-техн.конф.студентів, аспірантів та молодих вчених, 22-24 травня 2007 р.: тези допов.* – Дніпропетровськ, 2007. – С. 228.

98. Райзер В. Д. Вопросы надёжности строительных конструкций при износе. / В. Д. Райзер // *Исследования по строительной механике*. – 1985. – С. 61–66.

99. Растринин Л. А. Статистические методы поиска / Л. А. Растринин – М.: Наука, 1968. – 376с.

100. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.

101. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №11910. Збірка комп'ютерних програм «Пакет прикладних програм розрахунку

кородуючих плоско-напружених пластин методом скінчених елементів». / Д. Г. Зеленцов, Н. Ю. Науменко, ДВНЗ «УДХТУ». – 10.01.2005.

102. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №11910. Комп'ютерна програма «Автоматизована система розрахунку міцності кородуючих шарнірно-стержневих систем» («Ферма»). / Д. Г. Зеленцов, О. А. Радуль, ДВНЗ «УДХТУ». – 17.10.2005.

103. Советов Б. Я. Моделирование систем: Учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. Я. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.

104. Філатов Г. В. Основи еволюційної теорії ідентифікації математичних моделей корозійного руйнування. Монографія / Г. В. Філатов. – Дніпропетровськ, УДХТУ, 2010. – 191 с.

105. Флакс В. Я. К методике оценки сопротивляемости металлов сплошной коррозии / В. Я. Флакс / Защита металлов. – 1977. – Т13, №6. – С. 745–749.

106. Фрідман М. М. Концептуальні підходи при оптимальному проектуванні конструкцій, що функціонують в екстремальних умовах / М. М. Фрідман // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2002. – №70. – С. 158–175.

107. Химельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химельблау; пер. с англ. И.М. Быховской и Б.Т. Вавилова, под. ред. М.Л. Быховской. – М.: Мир, 1975. – 354 с.

108. Хог Э. Прикладное оптимальное проектирование [Механические системы и конструкции] / Э. Хог, Я. Арора; пер. с англ. В. М. Картвелишвили, А. А. Меликяна, под. ред. Н. В. Баничука. – М.: Мир, 1983. – 478 с.

109. Храпач Ю. А. Напряжённо-деформированное состояние и долговечность многоэлементных стержневых конструкций с учётом воздействия агрессивных сред: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Храпач Юлия Александровна – К., 2003. – 137 с.

110. Цикерман Л. Я. Прогноз опасности грунтовой коррозии для стальных сооружений / Л. Я. Цикерман, Я. Г. Штурман // Защита металлов. – 1967. – № 2. – С. 243–244.

111. Чернышев Ю. О. Методы управления точностью решения экстремальных задач на графах / Ю. О. Чернышев, В. А. Литвиненко, С. А. Ховансков, Е. В. Литвиненко // Известия ЮФУ. Технические науки, 2010. – №7. – С.84–91.

112. Шимановський О. В. Аналіз технічного стану та проблеми експлуатації будівельних металевих конструкцій в Україні / О. В. Шимановський, В. М. Гордеев, О. І. Оглобля та ін. // Будівництво України. – 2001. – № 3. – С. 48.

113. Alapati M. Discrete Optimization of Truss Structure Using Genetic Algorithm / M. Alapati // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 3, Issue 1. – P. 105–111.

114. Ashlock D. Evolutionary Computation for Modeling and Optimization / D. Ashlock. – New York: Springer, 2006. – 572 p.

115. Coello C. A. C. Discrete Optimization of Trusses using Genetic Algorithms / C. A. C. Coello // EXPERSYS-94. The Sixth International Conference on Artificial Intelligence and Expert Systems Applications. – 1994. – P. 331–336.

116. Czarnecki S. Multithreaded genetic program in truss shape optimization / S. Czarnecki // Теоретичні основи будівництва. Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Придніпровська державна академія будівництва. Warsaw university of technology. – Warsaw, 2000. – Вип. 8. – С. 556–560.

117. Czarnecki S. Optimal structural design using a genetic algorithm / S. Czarnecki // Теоретичні основи будівництва. Theoretical Foundations of Civil Engineering. – Придніпровська державна академія будівництва. Warsaw university of technology. – Warsaw, 1999. — Вип. 7. — С. 201–210.

118. Dillon R. L. Observations on the Mechanisms and Kinetics of Aqueous Aluminum Corrosion / R. L. Dillon // CORROSION. – 1959. – Vol. 15 (1). – P. 29–32.

119. Gutkowski W. Discrete structural optimization / W. Gutkowski. – International Centre for Mechanical Sciences. – Springer, 1997. – Vol. 373. – 250 p.

120. Liddard A. G. Corrosion of Steel in Chloride Environment/ A. G. Liddard, B. A. Whittaker // Journal of the Institute of Metals. – 1961. – №89. – P. 423–428.

121. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition) / S. Haykin. – Pearson, 2008. – 936 p.

122. Rajeev S. Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms / S. Rajeev, C. S. Krishnamoorthy // Journal of Structural Engineering. – 1992. – Vol. 118, № 5. – P. 1233–1250.

123. Wu S.-J. Steady-state genetic algorithms for discrete optimization of trusses / S.-J. Wu, P.-T. Chow // Computers & Structures. – 1995. – Vol. 56, № 6. – P. 979–991.

124. Zelentsov D. G. Determination of Rational Numerical Solution Parameters for Some Classes of Systems of Differential Equations / D. G. Zelentsov, O. R. Denysiuk // Ежемесячный международный научный журнал «NOVATION». – №4 июль 2016, часть 1. – Варна, 2016. – С. 34–37.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ

Директор  
ООО «Днепровская холдинговая компания»

ЛЮМИН В.А.

«01» сентября 2016 г.

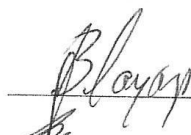
## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Комиссия в составе: главного инженера Лазарева В.А., начальника цеха Охрименко Л.В. и главного технолога Макаренко А.О. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – «Математическое моделирование и вычислительные методы» аспиранта ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет» ДЕНИСЮК ОЛЬГИ РОСТИСЛАВОВНЫ, посвящённой проблемам моделирования процесса коррозионного деформирования и оптимального проектирования шарнирно-стержневых конструкций, были использованы при проведении экспертных оценок остаточной несущей способности и разработке новых конструкторских проектов металлоконструкций промышленных зданий с учётом воздействия агрессивной заводской среды. Использование разработанных аспирантом Денисюк О.Р. математических моделей, оптимизационных алгоритмов и программного обеспечения позволило:

- уточнить прогнозные оценки запаса несущей способности металлоконструкций с использованием уточнённых моделей корродирующих сечений и предельного состояния;
- обоснованно определить сроки и содержание ремонтно-монтажных работ;
- при разработке новых конструкторских проектов с использованием оптимизационного алгоритма обоснованно назначить параметры металлоконструкций на основе критериев материалоемкости и долговечности.

Разработанные математические модели, вычислительные алгоритмы и программное обеспечение внедрены в инженерную практику, что позволило принять более эффективные конструкторские решения.

Главный инженер



В.А.Лазарев

Начальник цеха



Л.В.Охрименко

Главный технолог

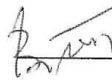


А.О.Макаренко



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Перший проректор ДВНЗ  
«Український державний хіміко –  
технологічний університет»

  
д.т.н., проф. Голєус В.І.  
« 06 »  2016 р.

## А К Т

про використання в навчальному процесі результатів  
дисертаційної роботи Денисюк О. Р.

Результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри інформаційних систем (ІС) Денисюк Ольги Ростиславівни впроваджені в навчальний процес підготовки фахівців спеціальності «Комп'ютерні науки» на факультеті комп'ютерних наук та інженерії (КНтаІ) ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет» та використовується при викладанні дисциплін «Математичне моделювання хіміко-технологічних процесів», «Методи еволюційного моделювання», «Нейронні мережі», «Методи дослідження операцій», а також при виконанні дипломних робіт бакалаврів та магістрів.

Завідувач кафедри ІС,  
д.т.н., професор



Д.Г. Зеленцов

Декан факультету КНтаІ,  
к.т.н., доцент



Левчук І.Л.

Начальник навчального відділу,  
к.т.н., доцент



Н.Ю. Ільченко

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
 Державний вищий навчальний заклад  
 «Український державний хіміко –  
 технологічний університет»  
 д.х.н., проф. Харченко О.В.

« 06 » жовтня 2016 р.

## ДОВІДКА

Дана аспіранту кафедри інформаційних систем Денисюк О.Р. про те, що деякі результати, які отримані під час виконання дисертаційної роботи, є складовою частиною науково-дослідних робіт кафедри інформаційних систем «Інтелектуальні інформаційні системи моделювання, аналізу та оптимального проектування складних систем» № держреєстрації 0114U002803.

Автором розроблено удосконалену математичну модель корозійного деформування шарнірно-стержневих конструкцій (ШСК), що експлуатуються в умовах впливу агресивного середовища. Запропоновано адаптований алгоритм методу ковзного допуску до розв'язання задач оптимізації таких конструкцій. Розроблено програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання процесу деформування та визначення оптимальних параметрів ШСК.

Використання нейронних мереж для управління похибкою обчислення функцій обмежень дозволило суттєво підвищити ефективність оптимізаційного алгоритму. За результатами чисельних експериментів застосування нових моделей та алгоритмів дозволило зменшити обчислювальні витрати при визначенні оптимальних параметрів кородуючих ШСК більш ніж на 500% у порівнянні з існуючими.

Вчений секретар кафедри ІС,  
 к.т.н., доцент



Коротка Л.І.

Інженер I категорії відділу  
 науково-технічної інформації,  
 нормоконтролер



Неткал Л.Б.