

**Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования
«Омский Государственный технический университет»**

На правах рукописи



Звонов Александр Олегович

**МЕТОДИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТИПОРЯДОВ
РЕЗИНОКОРДОВЫХ ПАТРУБКОВ**

2.3.7. – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Янишевская Анна Генриховна,
доктор технических наук

Омск - 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Задача автоматизации проектирования типорядов патрубков	13
1.1 Проектирование типорядов изделий.....	13
1.2 Специализированные САПР резинокордовых патрубков	16
1.3 Проектирование резинокордовых патрубков в САПР общего машиностроения	28
1.4 Технологии искусственного интеллекта и их применение в САПР	31
1.5 Выводы по главе 1 и постановка задач диссертации	37
Глава 2. Разработка методики автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков.....	39
2.1 Формализация проектирования резинокордовых патрубков	39
2.2 Выбор методов для шагов предложенной методики проектирования	42
2.3 Методика проектирования типорядов изделий.....	49
Выводы по главе 2	51
Глава 3. Математическое обеспечение проектирования резинокордовых патрубков	53
3.1 Математическая модель патрубка на системном уровне и общие зависимости на конструктивном уровне	54
3.2 Математическая модель типовых конструкций патрубков	63
3.3 Математическая модель патрубка на технологическом уровне	77
3.4 Объединение полученных математических моделей	80
Выводы по главе 3	86
Глава 4. Модификация и тестирование генетического алгоритма оптимизации.....	87
4.1 Модификация генетического алгоритма дифференциальной эволюции.....	87

4.2 Подготовка данных для тестирования алгоритма	92
4.3 Тестирование модифицированного генетического алгоритма дифференциальной эволюции	97
Выводы по главе 4	101
Глава 5. Информационное обеспечение и реализация подсистемы инженерных расчетов типорядов резинокордовых патрубков.....	102
5.1 Информационное обеспечение	102
5.2 Структура программы.....	109
5.3 Внедрение программы	112
Выводы по главе 5	115
Заключение	116
Список сокращений и условных обозначений	119
Список литературы.....	120
Приложение А.....	137
Приложение Б.....	138

Введение

Актуальность темы исследования. Одной из основных задач в автоматизации проектирования является задача синтеза объектов, часто решаемая как задача параметрической оптимизации. При этом объект в конечной точке оптимизации может существенно отличаться от исходного вида. Для проектирования новых изделий это оправдано, и даже может привести к ранее неизвестным техническим решениям. Однако на практике после разработки первого изделия часто требуется на его основе разработать несколько изделий, имеющих различия по 1-2 характеристикам. Такой набор изделий называется типорядом. Простейшим примером может служить типоряд болтов М8-М32 с шестигранной головкой и метрической резьбой. Основным отличительным параметром каждого из болтов данного типоряда является только его диаметр, определяющий все остальные размеры болта. Одним из основных преимуществ использования типорядов изделий является использование общей технологической базы (например, общее обрабатывающее оборудование, унифицированные технологические карты) что значительно снижает среднюю цену изделий. Преимущества производственной реализации типорядов изделий в машиностроении и других отраслях промышленности определяют актуальность разработки методики их автоматизированного проектирования.

Типоряды изделий необходимы во многих областях промышленности – от крепежа до нефтяных резервуаров и высоконагруженных турбин. В частности, большой интерес представляют резинкордовые патрубки (РКП), которые имеют разные типоразмеры и используются в различных ответственных пневматических и гидравлических системах. На современном уровне развития техники резинкордный патрубков представляет собой сложное изделие из композиционных материалов и профилированных металлических деталей. Применение цилиндрической стенки из композиционного материала (резины, армированной высокомодульными нитями) в рабочей, деформируемой части РКП позволяет использовать его в качестве

эффективной виброизолирующей или компенсирующей вставки трубопроводов. Поэтому актуальным является вопрос разработки методов автоматизированного проектирования применительно к типорядам РКП с использованием современных подходов к программной реализации алгоритмов оптимизации.

Важными и нерешенными остаются некоторые вопросы математического обеспечения в автоматизированном проектировании и расчетном обосновании конструкций РКП. Так, для сохранения монолитности армированной резиновой стенки используются различные специализированные конструкции заделки. Во многих из таких конструкций резина находится в состоянии всестороннего сжатия, что усложняет прочностные расчеты. Потеря физических свойств резины, к примеру, снижение её эластичности и т.д., обусловленная неизбежным воздействием озона, кислорода, повышенных температур, называется релаксацией и является предметом изучения научно-исследовательских институтов по всему миру. В математическом и алгоритмическом обеспечении автоматизированного проектирования для интеллектуальноемких изделий возрастает актуальность применения быстро прогрессирующих технологий искусственного интеллекта (ИИ).

Степень научной разработанности темы исследования

Применение методов теории твердого тела для расчета оболочек впервые рассмотрено С.П. Тимошенко. Основы методов расчета гибких резинокордных оболочек, в первую очередь в приложении к автомобильным шинам, заложены в работах В.Л. Бидермана, Э.И. Григолюка, за рубежом – S.K. Clark, K. Chamis. Важные уточнения теории оболочек, применимые к РКП, сделаны О.Н. Мухиным и Л.Б. Бухиным. В отечественной науке изучение релаксации полимеров связано с исследованиями А.С. Кузьминского, М.Б. Неймана, Н.М. Эмануэля, Г.Е. Заикова. Учет влияния релаксации на надежность конструкций РКП требует проведения различных специализированных расчетов. Автоматизация проектирования РКП требует создания математической модели, учитывающей указанные особенности данных конструкций. Современные разработки методов расчета гибких оболочек представлены в работах А.П. Евдокимова, В.А. Щепеткова, методов проектирования – Е.С. Аникина и Е.В. Климентьева.

Известны специализированные САПР, использующие аналитические расчеты РКП конкретных конструкций для автоматического расчета различных характеристик, к примеру, динамической жесткости – разработки специалистов научно-исследовательского конструкторско-технологического института шинной промышленности (НИКТИ ШП). После значительного сокращения научной деятельности НИКТИ ШП в 90-е годы и появления мощных универсальных САПР, они стали основным инструментом моделирования и расчета резинокордных оболочек. Так называемый «расчетно-экспериментальный» подход, совмещающий аналитические расчеты конструкции РКП в целом, численные расчеты РКП в отдельных постановках и статистическую обработку экспериментальных данных для верификации получаемых моделей, сформулирован И.А. Трибельским и В.Г. Цыссом. В рамках такого подхода могут быть использованы пакеты MatchCad, Matlab, AutoCAD, ANSYS, Abaqus и др. Недостатком такого подхода является отсутствие методологической базы.

Современные «средние» САПР обеспечивают ускорение процесса проектирования за счет ускорения работы с графическими элементами, внедрения связей между трехмерной моделью изделия и чертежами. Данный подход подробно рассмотрен в известных работах отечественных специалистов В.П. Корячко, И.П. Норенкова, А.А. Черепашкова. В представленных на рынке «тяжелых» САПР технологии автоматического проектирования, инженерии знаний, самообучающихся подпрограмм также не внедрены. Совершенствованию методологических основ САПР посвящены труды В.П. Быкова. Применению ИИ в САПР – работы В.В. Куприянова, В.Н. Малюха, за рубежом – Р.Л. Hagen, Р.Л. Veerkamp. Поскольку искусственный интеллект рассматривается специалистами как средство перехода от автоматизации рутинных операций к автоматизации творческих процессов, необходимо исследовать его применимость для решения формируемых практикой задач проектирования. В России данный вопрос успешно исследуется специалистами Оренбургского государственного университета, в том числе Д.В. Кондусовым, А.И. Сергеевым.

Целью диссертационного исследования является разработка и реализация методики автоматизированного проектирования типорядов резинокордовых патрубков в виде подсистемы САПР.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования**:

- разработать методику автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков;
- разработать математическое обеспечение автоматизированного проектирования типорядов резинокордовых патрубков с учетом типовых конструкций и технологий;
- разработать алгоритм численной оптимизации типоряда изделий;
- реализовать разработанную методику проектирования и алгоритм оптимизации типоряда изделий в виде подсистемы инженерных расчетов с человеко-машинным интерфейсом и необходимым информационным обеспечением;
- провести апробацию разработанной подсистемы.

Объектом исследования является процесс инженерного расчета типорядов армированных рукавов.

Предметом исследования являются методическое и математическое обеспечение автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков.

Методология и методы исследования. В ходе проведенных в диссертационной работе исследований были использованы методы сравнительного анализа – при анализе современного уровня предметной области; метод структурного анализа – при составлении математических моделей РКП; методы планирования эксперимента – при составлении тестовых данных для проверки исходного и модифицированного алгоритма автоматизации проектирования; методы глобальной параметрической оптимизации – при тестировании исходного и модифицированного алгоритма; методы статистического анализа – при анализе

данных, полученных в ходе тестирования исходного и модифицированного алгоритма; методы визуального и объектно-ориентированного программирования – в ходе программной реализации предложенного алгоритма и методики проектирования.

Научная новизна и соответствие паспорту специальности. В рамках исследования получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработана методика автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков, которая отличается включением в неё методов искусственного интеллекта и численной оптимизации, основанным на комплексном анализе процесса проектирования изделий.

Соответствие п. 1 паспорта специальности: «Методология компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования в технике и технологиях, включая постановку, формализацию и типизацию проектных и технологических процедур, алгоритмов и процессов проектирования»;

2. Разработаны математические модели шести конструкций РКП, которые отличаются совместным использованием системных, конструктивных и технологических параметров конструкции.

Соответствие п. 6 паспорта специальности: «Разработка компьютерных моделей, алгоритмов, программных комплексов оптимального проектирования технических изделий и процессов».

3. Разработан алгоритм дифференциальной эволюции, который отличается использованием рецессивных и доминантных генов при генерации поколений промежуточных решений.

Соответствие п. 6 паспорта специальности: «Разработка компьютерных моделей, алгоритмов, программных комплексов оптимального проектирования технических изделий и процессов»;

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанная методика совместно с разработанным алгоритмом и математическим обеспечением реализована в виде подсистемы, автоматизирующей инженерный расчет параметров изделий типоряда резинокордовых патрубков.
2. Разработанный алгоритм позволяет решать ряд последовательных задач минимизации без возврата к начальному состоянию популяции, что экономит временные и вычислительные ресурсы при проектировании новых изделий.
3. Разработанные математические модели РКП могут использоваться специалистами как непосредственно для расчётов изделий, так и для автоматизации расчётов РКП, что сократит время проектирования и повысит качество изделий.
4. Результаты диссертации получили внедрение в ФГУП «ФНПЦ «Прогресс», что подтверждается соответствующим актом внедрения. Кроме того, результаты работы используются в образовательном процессе ОмГТУ при выполнении лабораторных работ на факультете элитного образования и магистратуры, на что также получен акт внедрения. Результаты проведенных исследований включены в электронное учебное пособие «Системы автоматизации проектирования в машиностроении».

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика автоматизированного проектирования типорядов изделий.
2. Алгоритм численной оптимизации типорядов изделий.
3. Математические модели шести конструкций резинокордовых патрубков, включающие параметры системного, конструктивного, технологического и материального уровней проектирования.
4. Подсистема инженерных расчетов для автоматизированного расчета параметров изделий типоряда резинокордовых патрубков.
5. Результаты апробации разработанной инженерной методики.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов работы подтверждается:

- получением четырёх патентов РФ на конструкции РКП, разработанные с использованием полученных математических моделей;
- сравнительным анализом результатов тестирования немодифицированного и модифицированного алгоритмов на сериях вычислительных экспериментов, составлявших не менее 500 запусков каждая;
- разработкой и опытной эксплуатацией подсистемы инженерных расчетов, в которой реализованы модели и методы, предложенные в диссертации.

Основные положения диссертации были представлены на международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в изданиях ВАК, Scopus, WoS и положительно оценены специалистами, осуществляющими эксплуатацию разработанной САПР типорядов РКП.

Внедрение результатов диссертационной работы. Разработанная подсистема инженерных расчетов успешно применена на ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» при проработке заказа на серию РКП. Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на: 26 симпозиуме «Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов» (Москва, 2015); V Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации» (Санкт-Петербург, 2015); XXIV Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности» (Омск, 2015); XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (Рязань, 2017); Российской научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций» (Омск, 2017); XXII научно-практической конференции «Резиновая промышленность: сырьё, материалы, технологии» (Москва, 2017); XXIII научно-практической конференции «Резиновая промышленность: сырьё, материалы, технологии» (Москва, 2018).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 31 научной работе, из них 3 работы – в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, 3 работы – в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК, 4 патента РФ на изобретения.

Личный вклад автора. Исследования, результаты которых изложены в диссертации, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Соискателем самостоятельно разработаны все предложенные программы, модели, методы и алгоритмы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения. Список используемой литературы включает 165 источников. Общий объем диссертации составляет 137 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 35 рисунков и 19 таблиц.

В главе 1 проанализирована актуальность задачи автоматизации проектирования типорядов изделий в области проектирования резинокордовых патрубков, проведен аналитический обзор известных алгоритмов автоматизации проектирования резинокордовых патрубков, сформулированы задачи исследования.

В главе 2 проанализированы понятия и процессы проектирования, рассмотрено формальное определение процесса проектирования как последовательного отображения параметров объекта на одном уровне проектирования в параметры другого уровня. Предложена схема процесса проектирования как последовательного перехода между моделями в едином пространстве параметров. Составлены методики проектирования РКП и типорядов РКП, подразумевающие комбинирование методов функционального проектирования, математического моделирования, численной оптимизации и инженерии знаний.

В главе 3 проанализировано шесть конструкций РКП, для них составлены математические модели. Для всех параметров моделей приведены ограничения. Параметры полученных математических моделей объединены в единое пространство параметров. Сформулирована целевая функция минимизации материалоёмкости РКП.

В главе 4 предложена модификация генетического алгоритма оптимизации, сформулирована тестовая задача оптимизации. Для оценки эффективности оригинального и модифицированного алгоритмов выполнена их программная реализация. По результатам тестирования сделан вывод о том, что модифицированный алгоритм эффективнее оригинального на 50-100 процентов при последовательной оптимизации задач, в которых относительное различие целевых функций составляет от 20 до 50 процентов. Проектирование типоряда является задачей, удовлетворяющей данным критериям.

В главе 5 рассмотрена разработка информационного обеспечения, предложена блок-схема программной подсистемы САПР, объединяющей все разработанные компоненты, разработана соответствующая реализация подсистемы на языке высокого уровня. Успешно проведена практическая эксплуатация подсистемы на профильном предприятии.

Глава 1. Задача автоматизации проектирования типорядов патрубков

1.1 Проектирование типорядов изделий

Множество научных работ посвящено рассмотрению процесса проектирования и способов его автоматизации. Развитие техники в 21 веке невозможно без применения систем автоматизированного проектирования. Одним из крупных достижений теории проектирования явилось широкое внедрение принципа декомпозиции, в соответствии с которым сам процесс проектирования можно разделить на отдельные проектные процедуры. После такой декомпозиции каждая проектная процедура может рассматриваться как отдельный предмет автоматизации. Современные САПР автоматизируют многие «технические» процедуры процесса проектирования, связанные с подготовкой и представлением данных, геометрическим моделированием, численными расчетами.

Другим крупным достижением научной мысли в 21 веке стали технологии искусственного интеллекта. Сегодня под ними понимается набор различных подходов, к которым относятся и алгоритмы генетической оптимизации, доказавшие свою эффективность. Объединяет эти подходы то, что они позволяют вычислительной машине решать задачи, не поддающиеся полной формализации. Таким образом, применение технологий искусственного интеллекта в САПР должно расширить их возможности.

Существующие подходы, «тяжёлые» пакеты САПР, апробированные методики проектирования нацелены на быстрое получение оптимальных технических решений для конкретной конструкции. Однако на практике многие конструкции изделий не существуют самостоятельно. С целью унификации, удешевления производства при покрытии больших рынков сбыта, эффективные решения часто делают типовыми, создавая типоряды изделий. Задача автоматизации проектирования целого типоряда изделий сочетает многокритериальную оптимизацию при получении базовой

конструкции и оптимизацию с дополнительными ограничениями, фиксирующими общие параметры базового и нового изделия. Численные методы оптимизации, основанные на заполнении начальных параметров псевдослучайными значениями, не учитывают преемственность типовой конструкции относительно базовой. Таким образом, эффективность современных способов автоматизации проектирования типорядов изделий может быть повышена.

Сказанное актуально для многих областей промышленности, в том числе и для проектирования резинокордовых патрубков (РКП), которые являются ответственными и высокотехнологичными изделиями машиностроения [1].

Задача проектирования «частично подобных» объектов сформулирована давно. Исторически она была связана с макетированием сложных изделий и последующей обработкой результатов испытаний макетов [2]. Соответствующие методы были объединены под общим названием «теория подобия». В теории размерности и подобия устанавливаются условия, которые должны соблюдаться в опытах с моделями, и выделяются характерные параметры, определяющие основные эффекты и процессы. Теории подобия посвящен ряд монографий. К примеру, Л.И. Седов подробно рассматривает границы и возможности теории подобия, приводя также наглядные примеры [2]. Теория подобия и в настоящее время находит своё применение как в теоретических областях [3], так и при проектировании самых различных изделий - от сосудов [4] до ветроэнергетических установок [5].

За рубежом теория подобия также продолжает развиваться, можно отметить обзорную статью [6] и статью, рассматривающую применение теории подобия для сложных моделей [7].

С развитием унификации акцент исследований сместился с отношения «модель-изделие» на отношение «изделие-изделие». Унификация требует повторного использования конструкций, деталей, станков, техпроцессов при изготовлении изделий, покрывающих сравнительно широкий диапазон требуемых характеристик. Учитывая большую экономическую значимость вопроса

унификации, указания по составлению параметрических и типоразмерных рядов изделий отражены в регулирующих документах государственного уровня, к примеру [8], [9]. Согласно [9], типоразмерный ряд изделия – упорядоченная совокупность наборов числовых значений основных параметров, характеризующих типоразмеры изделий, числовые значения которых находятся в параметрическом ряду. Вводится также понятие «главный параметр» - параметр изделия, определяющий его наиболее характерное свойство. Согласно п. 1.16 [8], задача оптимизации параметрического (типоразмерного) ряда включает математическую модель оптимизации, состоящую из целевой функции и ограничений, и метод оптимизации. В соответствии с целью диссертации, данные компоненты должны быть рассмотрены при выполнении исследования.

В [10] для определения себестоимости детали или простой сборочной единицы предлагается многофакторная степенная зависимость следующего вида:

$$C'_i = C'_i A_i^u R^v \left(\frac{L}{A}\right)^w p^x t^y N_i^n, \quad (1.1)$$

где A_i – главный параметр (размер) t -го типоразмера;

R – основной параметр, совместно с главным параметром характеризующий габаритный размер;

L – основной параметр (размер), характеризующий габаритный размер детали в плоскости, перпендикулярной к плоскости измерения главного параметра;

p – стоимость единицы массы материала;

t – показатель, характеризующий точность изготовления и пропорциональный величине допуска на главный или основной параметр;

N_i – годовая программа выпуска изделий i -го типоразмера;

K_i, u, v, w, x, y, n – коэффициент и показатели степени, постоянные для деталей и сборочных единиц одного типа.

Однако данную зависимость сравнительно трудно применить к сложным сборочным единицам, в том числе к изделиям из композиционных материалов.

В целом указанные подходы ограничены закладываемыми в них математическими моделями изделий. К примеру, выполненное автором расширение типоряда эластомерных уплотнений потребовало значительного уточнения

математической модели [11]. Для повышения универсальности алгоритмов, основанных на таких подходах, может потребоваться включение нескольких математических моделей и последующего выбора между оптимальными решениями.

1.2 Специализированные САПР резинокордовых патрубков

Резинокордная оболочка (РКО) – сложная оболочечная конструкция, состоящая из слоёв резины и усиливающего материала. В современной технике такие оболочки применяются всё более широко. С их помощью успешно решаются актуальные задачи снижения вибраций машин (высокочастотная виброизоляция) и уменьшения нагрузок, действующих на различные технические объекты при однократных высокоамплитудных колебаниях (низкочастотная виброизоляция). В качестве примеров задач первого типа можно привести снижение нагрузок на фундаменты промышленных вибростанов, а задач второго типа – задачу защиты зданий от сейсмических воздействий, или виброизоляцию промышленных молотов. Сочетание высокой гибкости со способностью передавать сравнительно высокие нагрузки позволяет применять РКО для решения и других задач – к примеру, изготовления высокопроизводительных муфт [12, 13]. На рисунке 1.1 представлена типичная резинокордная оболочка [14].

Важным элементом любой резинокордной оболочки является её бортовая часть (зона), называемая также бортом РКО. Бортовая часть вместе с окружающей её металлоарматурой (например, фланцами крепления) называется бортовым соединением РКО. Основными функциями бортового соединения являются надёжная фиксация армирующих оболочку нитей и обжатие внутреннего резинового слоя РКО для поддержания герметичности внутренней полости.

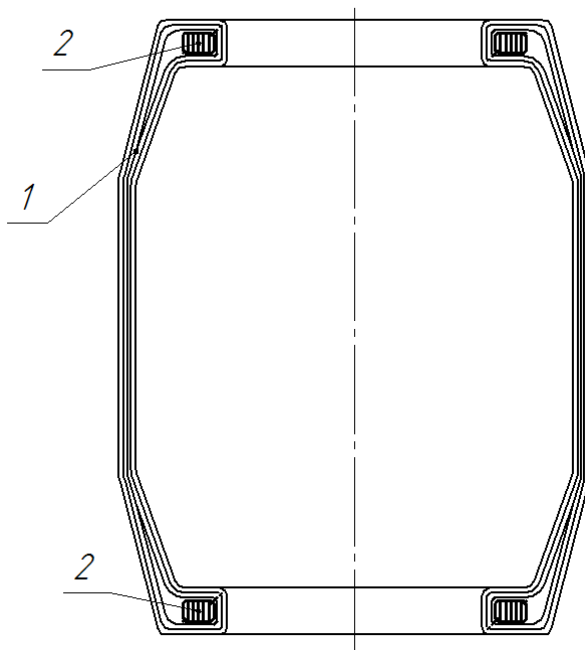


Рис. 1.1. Типичная резинокордная оболочка, патент RU №2 369 786.

1 – слои резины и корда; 2 – бортовые кольца

Типичная конструкция бортового соединения РКО изображена на рисунке 1.2. Слои резины, армированные высокопрочными нитями, для их лучшего удержания, как правило, обматываются вокруг бортовых колец, а затем вместе с бортовыми кольцами обжимаются металлическими частями амортизатора или другого узла.

По технологическим причинам высокопрочные нити могут укладываться только в составе специальных полотен, формируя слои РКО, в которых все нити имеют одно направление и слабо связаны между собой. Для предотвращения расхождения не связанных между собой нитей одного слоя, другой слой накладывают поверх него и с некоторым угловым смещением – таким образом формируется силовой каркас оболочки.

Для защиты слоёв силового каркаса от внешнего воздействия (ультрафиолет, пыль, технические смазки) добавляют специальный наружный слой, который может быть и не армированным.

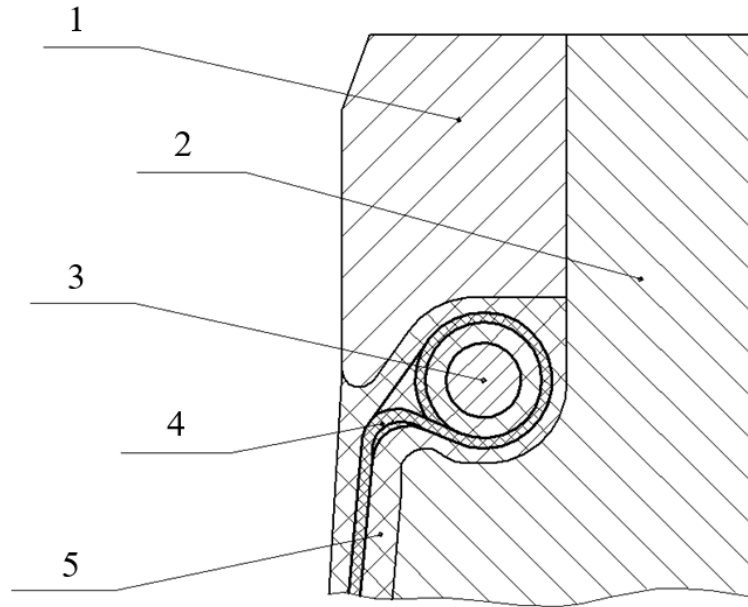


Рис. 1.2. Типичное бортовое соединение РКО

1, 2 – металлоарматура; 3 – бортовое кольцо; 4 – слои корда; 5 – слои резины

Бортовое кольцо, вокруг которого обматывают слои корда, испытывает преимущественно нагрузки растяжения и сжатия.

Процесс эксплуатации оболочки сопровождается протеканием в материале борта релаксационных процессов, что может существенно повлиять на надежность соединения [15-17]. Оболочка может дополнительно включать отдельную герметизирующую камеру. Резинокордные патрубки представляют собой РКО, в которых оболочка имеет форму цилиндра. В отличие от рукавов высокого давления, патрубки имеют длину оболочки не более пяти внутренних диаметров. Это обусловлено тем, что патрубки используются не взамен трубопроводов, а в качестве виброизолирующих вставок в них.

С целью обобщения технических решений по существующим конструкциям РКП, были выполнены патентные исследования. По результатам исследований составлена классификация конструкций РКП, приведенная на рисунке 1.3.

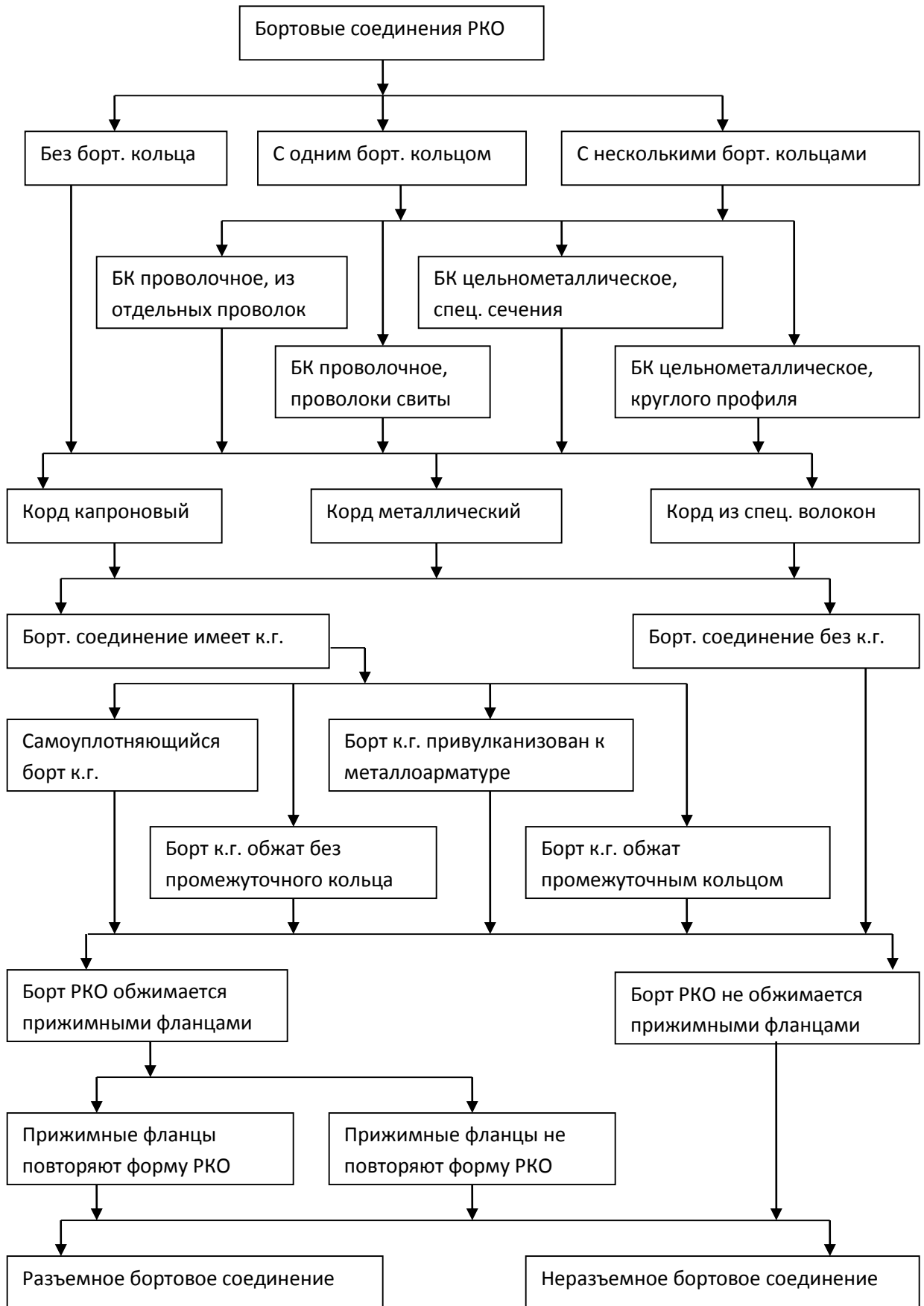


Рис. 1.3. Классификация РКО по типу бортового соединения
 БК – бортовое кольцо, к.г. – камера герметизирующая

На основании проведенного обзора и полученной классификации предложено несколько новых технических решений, на которые получены патенты РФ на изобретения [18-21].

Процесс проектирования технического изделия в большинстве случаев можно представить в виде следующей последовательности этапов:

- разработка технического задания;
- разработка технического предложения;
- разработка эскизного проекта;
- разработка технического проекта [22].

Поскольку бортовая зона РКП обеспечивает и работоспособность силового каркаса и герметичность внутренней полости, она является наиболее ответственной частью оболочки в целом, и именно конструкция бортовой зоны во многом определяет параметры РКП. Для рационального проектирования бортовой зоны, в свою очередь, требуется рассчитать параметры её напряженно-деформированного состояния в различных режимах работы РКП. К таким режимам относятся:

- обжатие борта при монтаже (необходимо провести анализ максимальных контактных напряжений в зоне борта);
- работа РКП при действии давления в его внутренней полости (необходимо провести анализ максимальных усилий в нитях силового каркаса, и соответствующих усилий в бортовых кольцах);
- обжатие борта в конце срока эксплуатации (необходимо подтвердить соответствие контактных напряжений минимальным напряжениям, необходимым для работы оболочки).

Эти задачи могут решаться как современными САПР общего назначения, так и специализированными САПР, использующими аналитические методы, основы которых заложены в 1960-е годы.

Среди средств автоматизации проектирования, применяющихся в настоящее время, можно выделить средства автоматизации расчетов и создания конструкторской документации. При этом выпуск конструкторской документации на РКО не требует специальных средств, в то время как расчет бортовых соединений зачастую производится по отдельным методикам.

Как показано в работе [23], различные аналитические методы расчета резинокордных оболочек и их бортовых соединений сравнительно легко могут быть перенесены на ЭВМ в виде расчетных модулей. Эти модули в дальнейшем могут быть использованы для автоматизации расчетов при проектировании изделий в режиме работы с неспециализированными САПР. Бортовое соединение при этом обычно рассматривается совместно с оболочкой в целом [24].

Аналитическое решение задачи о равновесной конфигурации оболочки в самой простой постановке было получено на основе безмоментной теории сетчатых оболочек. Например, в работе [25] выведено уравнение, позволяющее построить профиль армированной кордом оболочки:

$$\frac{\rho}{R_K} = \frac{1 - \lambda_0^2}{\lambda} \cdot \frac{\cos \beta_K \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \beta_K}}{2 - (3\lambda^2 - \lambda_0^2) \cdot \sin^2 \beta_K}, \quad (1.1)$$

где $\lambda = r / R_K$;

$\lambda = r_0 / R_K$;

β_K – угол нитей корда на экваторе оболочки;

ρ – радиус дуги касательной окружности в рассматриваемой точке;

r – расстояние от рассматриваемой точки до оси симметрии оболочки;

r_0 – расстояние от оси симметрии оболочки до наиболее широкого места профиля;

R_K – радиус экватора.

За рубежом широко известна монография С. Кларка, в которой излагаются аналогичные подходы [26].

Построение законченного профиля производится его заменой на дугу окружности радиуса ρ на каждом малом участке. Такое расчетное построение рационально проводить с использованием ЭВМ.

В данной работе уделено внимание расчету бортовой зоны РКО. Отмечено, что усилия на бортовые кольца передаются с кордных слоёв каркаса. Получена формула для расчета усилия T в кольце:

$$T = \rho \frac{(R_K^2 - r_0^2) \cos \beta_K}{2 \cos(\alpha_{\text{кол}})}, \quad (1.2)$$

где $\alpha_{\text{кол}}$ – угол нитей корда в крайней точке кольца (точке перехода к боковой стенке РКО).

Далее, в работе Л.Б. Бухина [27] расчет равновесной конфигурации оболочки проведен с учетом нелинейно растяжимого корда. При этом упругая характеристика нитей описывается в произвольной форме:

$$N = N(\varepsilon) \text{ или } \varepsilon = \varepsilon(N), \quad (1.3)$$

где N – усилие в нити корда;

ε - упругое удлинение нити корда.

Предполагается использовать действительный вид зависимостей упругого удлинения нити от действующего на неё усилия, получаемый экспериментально. Выведено следующее важное соотношение:

$$\cos^2 \beta = \frac{1}{N(1 + \varepsilon)} \left(\int_0^\varepsilon N(\varepsilon) d\varepsilon + C \right), \quad (1.4)$$

где β – угол, составляемый нитью корда с меридианом оболочки.

Входящий в него интеграл может быть найден численным интегрированием зависимости $N(\varepsilon)$. Постоянная интегрирования C находится из условия, что на экваторе оболочки $\varepsilon = \varepsilon_K$, $N = N_{\text{max}}$ и угол $\beta = \beta_K$:

$$C = N_{\text{max}} (1 + \varepsilon_K) \cos^2 \beta_K - \int_0^{\varepsilon_K} N(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (1.5)$$

В результате:

$$\cos^2 \beta = \frac{1}{N(1+\varepsilon)} \left[\max (1+\varepsilon_{\kappa}) \cos^2 \beta_{\kappa} - \int_{\varepsilon}^{\varepsilon_{\kappa}} N(\varepsilon) d\varepsilon \right] \quad (1.6)$$

Уравнение (1.6) является основным в задаче о нелинейной деформации корда, поскольку связывает удлинение нитей ε и усилие N в любой точке профиля с величиной угла β .

Описанный подход позволяет автоматизировать строение уточненных равновесных конфигураций оболочек вращения и обобщающих их номограмм [28], дающих в безразмерной форме семейства возможных профилей равновесных конфигураций для различных конструктивных параметров с учетом бортовых заделок, что значительно сокращает этап эскизного проектирования оболочки. Пример номограммы, построенной с использованием средств автоматизации, и отображающей зависимость радиуса расположения точки бортовой заделки $r_{об}$ от радиуса экватора оболочки R представлен на рис. 1.3. Среди зарубежных работ, посвященных построению профилей пневматических шин, можно отметить [29].

Для автоматизации проверочных расчетов был разработан комплекс программ [30], включающий отдельные программы, выполняющие следующие функции:

1. Осуществление взаимодействие пользователя с остальными программами.
2. Корректный ввод данных и их преобразование во внутренний формат программной системы.
3. Расчет и вывод в табличном виде профиля средней линии каркаса надутой оболочки, приращения радиусов в различных точках по ширине экватора, окружных усилий и деформаций в нитях корда и ряда других параметров и промежуточных результатов.
4. Расчет радиального обжатия оболочки. Вычисляются нагрузочная характеристика, прогиб при заданной нагрузке, длина контакта, распределение контактного давления, радиус свободного качения и ряд других параметров.
5. Печать результатов расчета и поясняющего текста.

6. Расчет боковой жесткости оболочки и изгибной жесткости силового каркаса по отношению к изгибу в осевом направлении.

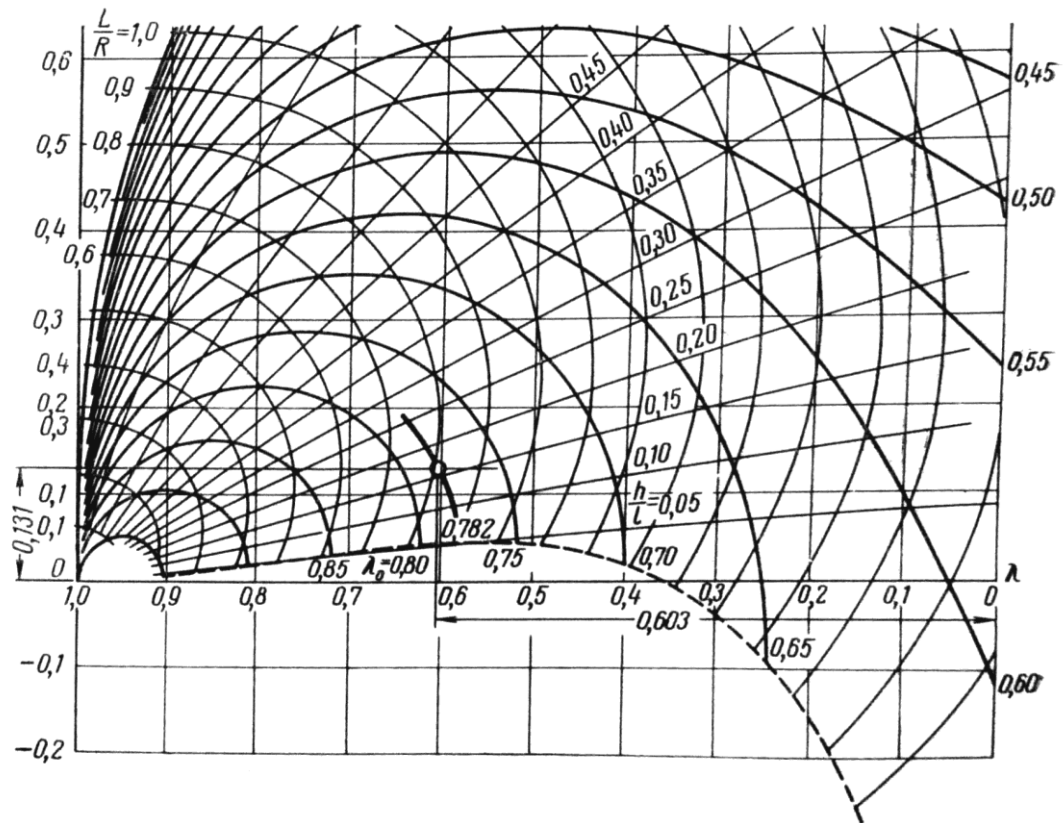


Рис. 1.3. Номограмма, используемая для определения отношения $r_{об} / R$, построенная с использованием средств автоматизации.

λ – расстояние от оси вращения до анализируемой точки профиля,
 L – длина участка нити от экватора до анализируемой точки

Расчеты производятся по следующим входным данным: внутреннее давление, радиальная нагрузка, боковая нагрузка, длина боковой стенки, расстояние между точками борта, расстояние между точками меридиана, радиусы бортов и меридиана и нескольким дополнительным геометрическим параметрам профиля. Отдельной группой являются входные данные, характеризующие материалы оболочки: модуль сжатия связующей и покровной резины, модуль сдвига, коэффициент трения по опорной поверхности, число слоёв корда, плотности нитей, толщины слоёв, жесткости нитей на растяжение, модули сдвига резины в кордных слоях, углы закроя.

Анализ результатов уточненного расчета, приведенный в работе [27], показывает, что влияние растяжения корда на форму профиля надутой оболочки невелико, поэтому в проектных расчетах им можно пренебречь.

Точность расчетов по безмоментной теории сетчатых оболочек анализируется, например, в работах О.Н. Мухина [31], [32]. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных, выделены следующие основные факторы, определяющие погрешность расчета по безмоментной теории:

1. Общее число нитей в реальном изделии не поддается точному определению.
2. Величина угла между направлением нити и меридианом оболочки изменяется при эксплуатации изделия в зависимости от изменений внутреннего давления и других факторов.
3. Выбор краевой точки бортовой заделки является условным.
4. Сетчатая оболочка сама по себе является ограниченной моделью реальной РКО.

Таким образом, был определен предел применимости безмоментной теории сетчатых оболочек, который оказался недостаточным для точных практических расчетов, и внимание исследователей сосредоточилось на разработке качественно новых моделей.

Были построены модели на основе безмоментной теории ортотропных оболочек, позволяющие учесть влияние не только резины, но и различие в механико-геометрических параметрах элементарных резинокордных слоев. Так, в работе [33] для определения геометрии поверхности приведения были использованы сглаживающие кубические сплайны.

Расчет многослойных оболочек на основе теории, использующей обобщенную гипотезу Тимошенко для всего пакета слоёв, и учитывающей локальные эффекты выполнен в работе [34]. Получена формула, связывающая усилия и перемещения с учетом структуры композита:

$$Q_1 = \sum_{k=1}^N (q_{22}^{(k)} \varepsilon_{13}^{(k)} - q_{12}^{(k)} \varepsilon_{23}^{(k)}), \quad (1.7)$$

где Q_1 – удельное поперечное перемещение;

$q_{ij}^{(k)}$ – коэффициенты поперечного сдвига k -го слоя;

$\varepsilon_{ij}^{(k)}$ – деформация k -го слоя;

N – число слоёв.

Кроме того, в работе [34] подробно рассматривается вопрос аналитического исследования нелинейного характера распределения напряжений и деформаций по толщине оболочки вращения.

Сложность решения контактной задачи оболочки с основанием при рабочих динамических нагрузках предполагает использование численных методов: тригонометрических рядов, локальных вариаций, конечных разностей или конечных элементов.

Теоретическое обоснование метода тригонометрических рядов и пример использования этого метода приведены в работе [35]. Решение нелинейной двумерной контактной задачи осуществляется в два этапа: вначале определяется, обычно по теории сетчатых оболочек, равновесная конфигурация оболочки, затем решается в линейной постановке неосесимметричная задача для предварительно напряженной оболочки, исходная конфигурация которой совпадает с равновесной. Решение задачи автоматизировано, выходными данными программы являются таблицы двух аргументов: деформации ε поверхности оболочки и угла корда в θ в данной точке. По расчетным данным могут быть построены контурные диаграммы (рис. 1.4).

В работе [36] задача расчета напряженно-деформированного состояния многослойных анизотропных оболочек вращения сложной формы сведена к решению нормальной системы линейных дифференциальных уравнений n -го порядка (n – четное число). Приводится описание нескольких специализированных расчетных процедур на языке PL/1, автоматизирующих процесс расчета.

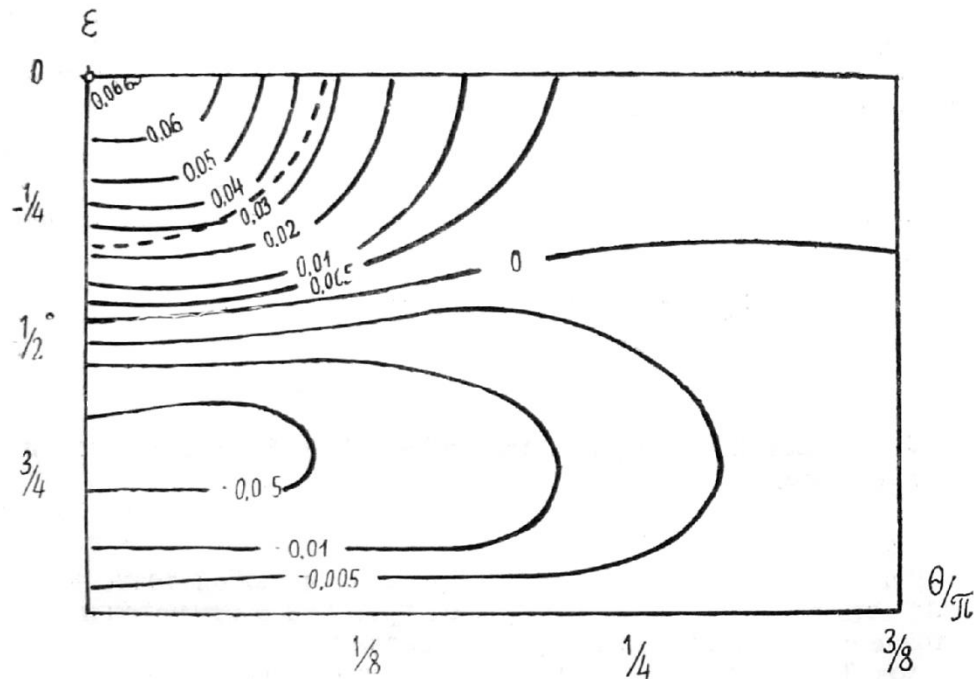


Рис. 1.4. Контурная диаграмма нормальных перемещений на единице поверхности оболочки, построенная на основе автоматизированного расчета.

С начала 80-х годов в специализированных САПР оболочек стал применяться метод конечных элементов [37]. В работах [38], [39] описан «шаговый метод» расчета НДС, который имеет ряд других важных особенностей кроме применения метода конечных элементов. На каждом шаге данного расчета учитывается влияние релаксации резины, что позволяет учесть эффекты снижения напряжений с течением времени, а также эффекты ползучести. Как указано в [38], для учета этих дополнительных факторов использована реологическая модель Максвелла. Однако дальнейшего развития этот подход не получил.

Широкое распространение метода конечных элементов обусловлено тем, что при использовании такой САЕ-системы у инженера нет необходимости глубоко знать детали используемого в ней расчетного метода.

В первых версиях САЕ-систем был затруднен анализ таких эффектов, как неоднородность, анизотропия деформативных свойств, сдвиговая жесткость и т.д., поскольку решение таких задач требует введения специфических конечных

элементов. После наработки подобных элементов и опыта работы с ними метод конечных элементов стал преобладающим при проектировании многослойных армированных оболочек. Далее, после включения этих методов в такие программные комплексы как ANSYS, Abaqus, MSC Marc – в этой области практически остановилась разработка специализированных САПР.

Тем не менее, стоит отметить, что на начальном этапе проектирования специализированные аналитические методы расчета могут обеспечить более высокую скорость получения результата по сравнению с «тяжелыми» неспециализированными коммерческими пакетами [40].

1.3 Проектирование резинокордовых патрубков в САПР общего машиностроения

В настоящее время САПР широко применяются для автоматизации расчетов и создания конструкторской документации. Аппарат вычислительной математики, прежде всего аппарат конечно-элементного (КЭ) анализа, реализованный в современных универсальных программных продуктах, позволяет в том числе производить и расчеты изделий, содержащих высокоэластичные материалы, к которым можно отнести РКП. Наиболее популярными пакетами для МКЭ-расчетов являются ANSYS, Abaqus, NX Unigraphics. Все они, однако, основаны на давно известных принципах [41], [42]. Известна также и важная особенность метода конечных элементов: при его применении необходимо чётко ограничивать решаемую задачу и результирующие значения. Это требует от специалиста специфических знаний, относящихся к области решаемой задачи. В качестве примера можно привести две задачи – расчет стенки композитного материала на прочность и расчет её циклического деформирования. В первом случае допустимо использовать анизотропную модель материала с усредненными характеристиками, а во втором случае такое упрощение приведет к некорректному результату [43]. Применительно к бортовым заделкам можно привести пример расчета бортового кольца как цельнометаллического, либо навитого из отдельных проволок (такая

конструкция широко используется в автомобильных шинах). Описанная особенность означает, что на результат каждого конечноэлементного расчета влияют такие факторы как опыт расчётчика, требуемая точность, имеющиеся вычислительные ресурсы, качество расчетной модели [44].

Рассмотрим схему и особенности расчета бортового соединения методом КЭ на примере бортового соединения, показанного на рис. 1.5 [45]. Необходимо дополнительно отметить, что существующие аналитические методы расчета бортов ориентированы на оценку прочности бортовых колец без учета обжатия борта. Расчет методом КЭ позволяет устранить этот недостаток и определить искомые величины для каждой точки всех элементов изделия.

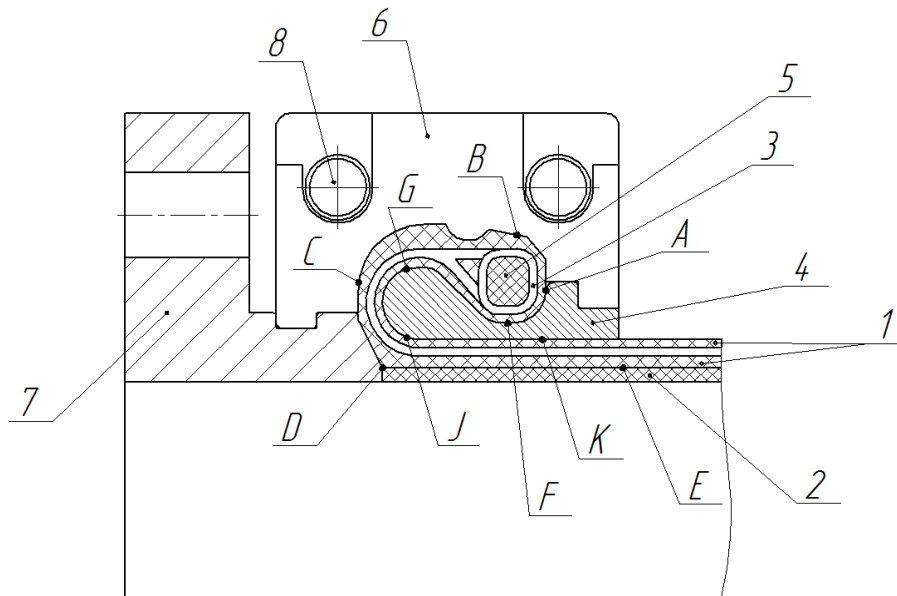


Рис. 1.5. Бортовое соединение (вариант)

1 - слои резины; 2 - герметизирующий слой; 3 - слои армирующего материала; 4 - основное бортовое кольцо; 5 - дополнительное бортовое кольцо; 6 - два полукольца; 7 - наружный фланец; 8 – болты

При монтаже оболочки производится обжатие бортовой зоны РКО подвижной деталью или фланцем по линии ABC. При этом на всей поверхности борта (линии ABCD, FGJK) возникает давление, фактическое значение которого определяет

герметичность конструкции. Подача давления во внутреннюю полость оболочки создает дополнительную нагрузку по линии DE и вызывает перераспределение напряжений во всей конструкции борта. Этапы расчета показаны на рисунке 1.6.

Поскольку опыт расчетчика не может быть увеличен выше определенного предела, повышение точности КЭ-расчетов зачастую требует значительных затрат на уточнение модели и новые вычислительные ресурсы. Проектирование целого типоряда изделий с применением описанных расчётных методов требует еще больших затрат.

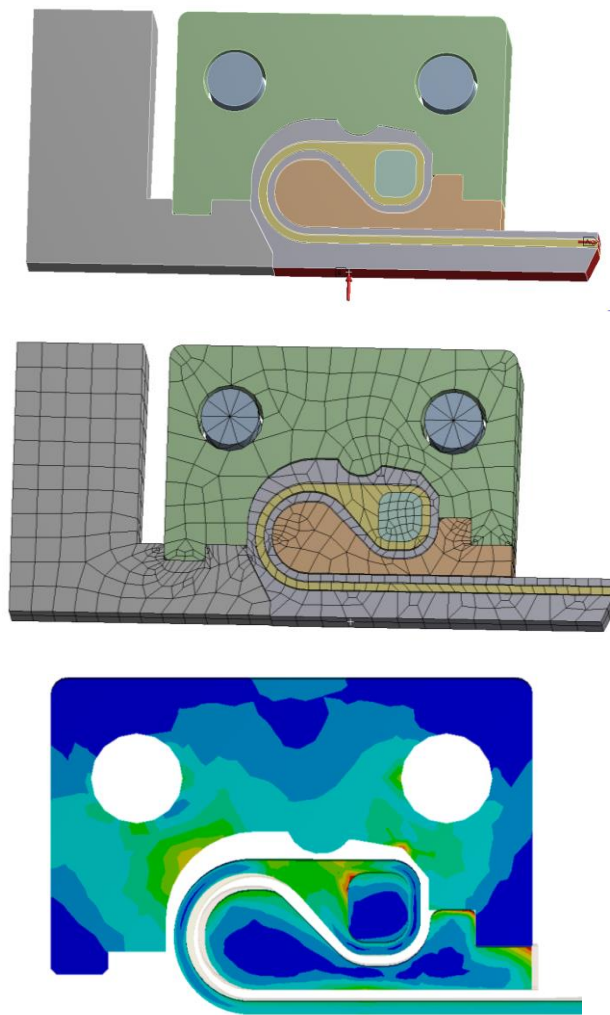


Рис. 1.6. Этапы расчета напряжений в КЭ-модели: построение геометрической и расчетной модели, разбиение на элементы, расчет и анализ результатов

1.4 Технологии искусственного интеллекта и их применение в САПР

Практика построения автоматизированных систем управления показывает, что для повышения степени автоматизации какого-либо процесса, вначале требуется разработка математической модели проектируемого объекта и эффективных вычислительных процедур для работы с ней. Такова, к примеру, геометрическая модель объекта. В целом в САПР наибольшие успехи в области математической формализации достигнуты в задачах параметрической оптимизации и численного анализа, тогда как в задачах функциональной компоновки и структурного синтеза автоматизация применяется гораздо реже. Методы искусственного интеллекта могут быть перспективным подходом в данном направлении исследований.

Искусственный интеллект (ИИ) иногда определяют как область информатики, занимающуюся автоматизацией разумного поведения [46].

Теоретические и практические предпосылки применения ИИ в САПР в начале 1990-х годов обобщены в работе [47]. К началу 1990-х гг. также относятся известные сборники докладов симпозиума *Intelligent CAD Systems* под редакцией V. Akman, P. Veergamp и других специалистов [48-50]. В перспективе интеллектуализация САПР предлагает непосредственное использование системы понятий данной предметной области, представление знаний о проектировании изделий или процессов в естественной форме, а также автоматическую генерацию конструктивных решений. Современное состояние вопроса применения обсуждается в работах Zha X.F., к примеру [51].

В известной работе [46] выделяются следующие направления исследований в области искусственного интеллекта(AI):

Автоматические рассуждения и доказательство теорем. Одна из старейших областей искусственного интеллекта. Первые публикации относятся к концу 1950-х – началу 1960-х [52], [53]. В дальнейшем были получены формализованные алгоритмы поиска, разработаны языки формальных представлений, язык PROLOG, широко использующийся в системах ИИ.

Автоматическое доказательство основано на логике, и может быть легко включено в состав САПР. Однако практическое использование этого метода является затруднительным. Любая относительно сложная система включает в себя множество логических взаимосвязей. В результате программа автоматического доказательства тратит много времени на доказательство выдвигаемых ею теорем, не относящихся к основной задаче. Для решения этой проблемы необходима разработка методов, направляющих поиск нужной теоремы.

Областью, в которой автоматические рассуждения и доказательства наиболее применимы в настоящее время, является автоматическая валидация программных алгоритмов и логических схем.

Второй проблемой таких систем является сложность их тестирования [54]. Однако длительное развитие, реализация системного подхода в системах автоматического вывода могут позволить им стать базисом для построения САПР, целиком основанной на принципах ИИ.

Экспертные системы. В основе теории экспертных систем лежит представление о разделении знаний на предметные области. Экспертные знания являются отражением предметных областей. Экспертные системы создаются путём заимствования знаний о предметной области у человека-эксперта и их представления в определенном виде. Этот процесс осуществляется специалистами по составлению экспертных систем, или инженерами по знаниям.

Хотя практическое применение подобных систем было начато в 1960-е гг. [55], они и в настоящее время фактически используются только в областях, в которых уже имеются алгоритмы получения конечного результата [57].

Основные проблемы экспертных систем:

Трудности при передаче знаний от экспертов: эксперты зачастую не могут сформулировать самые общие, интуитивные правила принятия решений.

Недостаток гибкости и интеллектуального поведения. Трудно проводить дообучение экспертной системы, так как эксперт в этом случае вынужден

пересмотреть свои прежние рекомендации. Самостоятельное же обучение экспертной системы практически невозможно [58]. Фактически, созданная система обладает набором стратегий принятия решений который трудно поддается модификации.

Трудности тестирования экспертных систем, обусловленные большим числом вариантов, а также важностью решаемых этими системами задач.

Таким образом, экспертные системы хорошо подходят для *объединения* различных сложных компонентов систем, имеющих различную логику.

Понимание естественных языков и семантическое моделирование. Одной из возможностей применения искусственного интеллекта является ведение диалога с пользователем на естественном языке.

Понимание естественного языка включает в себя не только понимание значения отдельных слов. Более важными являются такие свойства системы как понимание значения контекста и понятия «предмета беседы».

Долгое время в этой области успешно применялись семантические сети. Развитие и взаимное проникновение подходов привело к тому, что в последнее время в области понимания языка достигнуты значительные успехи [59]. Тем не менее, полное понимание языка вычислительным устройством всё еще не достигнуто.

Работа с естественным языком в САПР может быть наиболее полезной при реализации *интерфейсов* для сложных компонентов.

Моделирование работы человеческого интеллекта. Многие системы искусственного интеллекта моделируют только внешние проявления разумности – их методы достижения результата могут существенно отличаться от процессов человеческого мышления. И хотя такие системы помогают решать задачи, ранее недоступные компьютерам, их нельзя назвать интеллектуальными. Моделирование работы разума, поиск используемых им стратегий, стимулируют разработку новых подходов в области ИИ. В качестве примера можно привести методiku принятия решений, нашедшую широкое применение не только в математике, но и в социальной психологии и экономике [60].

Хотя данный подход мог бы послужить основой построения *полноценной САПР*, для этого всё еще необходимо решить множество фундаментальных проблем как в области ИИ, так и в области проектирования.

Планирование и робототехника. Основной задачей планирования является поиск последовательности операций, приводящих к требуемому результату. Сложность планирования быстро растет с увеличением числа степеней свободы, поэтому большое значение имеют способы представления знаний и управления перебором. Задача декомпозиции упрощает поиск решения, но и сама является весьма сложной, поскольку предполагает разработку эвристик и методов управления планированием. Также вновь возникают задачи самообучения и принятия решений на основе неполной информации [61].

Широкое практическое внедрение робототехники также связано с развитием агентно-ориентированных систем [62]. Всё это делает робототехнику одной из самых сложных областей современной техники.

Прямая связка между моделью изделия и промышленными роботами может быть эффективной основой для различных САПР ТП, правда подходы робототехники могут использоваться при этом только для построения *подсистем*.

Машинное обучение. Проблема обучения систем, в т.ч. и самообучения, является одной из самых важных, но и самых трудных в области ИИ. Способность к обучению является также и важной характеристикой интеллектуальности в целом. Разработки 70-х и 80-х гг. основывались преимущественно на алгоритмическом подходе [63], [64]. Позже началось развитие популярных в настоящее время биологических и социальных моделей обучения [65]. Самообучение может быть внедрено во многих *подсистемах* САПР для повышения эффективности работы пользователей.

Нейронные сети и генетические алгоритмы. Программирование описанных выше систем предполагает точную формулировку алгоритмов, методов перебора, способов представления знаний. Альтернативный подход заключается в построении

программ, описывающих начальное состояние системы и механизмы её развития. К таким системам относятся искусственные нейронные сети и генетические алгоритмы.

Область искусственных нейронных сетей (ИНС) развивается с 60-х гг., основываясь на классических работах Розенблатта [66]. В искусственной сети имеются взаимосвязанные входные, промежуточные и выходные нейроны, и значения, полученные из выходных нейронов, считаются выходными данными сети. Таким образом, выходные значения являются результатом параллельной распределенной обработки данных, а сама сеть – сложной системой, совмещающей функции памяти и процессора [67]. Имеется ряд других важных особенностей: к примеру, благодаря наличию большого числа нейронов, сеть может обладать помехоустойчивостью, сохранять работоспособность даже при утрате части своей структуры и т.д. Прямое добавление новых данных в сеть практически невозможно – единственным способом является её обучение на обучающих выборках с использованием различных критериев. Это создаёт дополнительные проблемы, связанные с возможным переобучением или переносом недостатков выборки в «знания» сети.

Генетические алгоритмы (ГА) являются одним из средств получения новых решений на основе предшествующих результатов. Они функционируют над однотипными наборами данных аналогично реальным процессам генетической мутации и наследования. При правильной настройке мутаций, наследования и критериев (целевых функций), с каждым поколением формируется всё более удовлетворительное решение. Генетические алгоритмы также как и НС располагают к параллелизации вычислений.

Существенным достоинством ИНС и ГА является их универсальность – применение этих методов для решения задачи планирования или оптимизации требует только представления этой задачи в виде набора данных. Однако получаемое решение всегда будет приближенным, а попадание в глобальный минимум/максимум не гарантировано.

Необходимо отметить, что при работе с англоязычными источниками по ИИ всегда требуется адекватный перевод применяемой терминологии [68].

Подходы к автоматическому решению задач классификации и оптимизации также могут быть основой для создания *подсистем* САПР.

Отметим общие черты описанных подходов. Они позволяют [69], [70]:

1. Использовать ЭВМ для автоматизации рассуждений, распознавания, доказательства.
2. Решать задачи, не поддающиеся алгоритмическому решению; использовать эвристический поиск.
3. Принимать решения на основе неполной информации; поддерживают формализацию.
4. Автоматизировать выделение качественных характеристик объектов.
5. Анализировать данные с точки зрения их семантики и синтаксиса.
6. Находить приблизительное решение, настраивая его близость к оптимальному.
7. Использовать большое число специфических знаний и эмпирических методов в выбранной предметной области.
8. Использовать знания метауровня для осуществления оптимальной стратегии принятия решений.

На основе проведенного анализа литературы выделено три уровня интеллектуализации САПР:

На первом уровне средства ИИ используются лишь как компоненты отдельных подпрограмм САПР.

Второй уровень предусматривает наличие в САПР, построенных на традиционных принципах, подсистем (проектирующих или обслуживающих), полностью организованных в соответствии с методологией ИИ.

Третий уровень интеллектуализации достигается при построении САПР целиком на организационных принципах систем ИИ с использованием как формальных, так и эвристических процедур проектирования.

Именно интеллектуальные подсистемы могут существенно расширить функционал современных САПР. Они предлагают эффективные способы автоматизации решения творческих задач, планирования, общения с пользователем на естественном языке [71].

1.5 Выводы по главе 1 и постановка задач диссертации

Проведенный анализ показал актуальность задачи автоматизации проектирования типорядов изделий в области проектирования резинокордовых патрубков.

Патрубки, имеющие меньшую относительную длину по сравнению с рукавами высокого давления, могут быть выбраны в качестве объекта автоматизации проектирования поскольку их математические модели достаточно просты (резинокордная часть имеет простую форму), однако применение патрубков для виброизоляции трубопроводов имеет большое практическое значение.

По результатам аналитического обзора известных алгоритмов автоматизации проектирования резинокордовых патрубков выделено два алгоритма: с использованием специализированных САПР и с использованием САПР общего машиностроения. Обзор современных технологий искусственного интеллекта показал, что они могут быть успешно внедрены в состав САПР, расширив её функциональность. Выделено три уровня интеллектуализации САПР:

- на уровне компонентов подсистем;
- на уровне подсистем;
- полная замена основных алгоритмов.

Проведенный анализ также показал, что наиболее гибким подходом к автоматизации проектирования РКП является подход, сочетающий различные

методы решения задач проектирования. Однако для обеспечения эффективности такого подхода требуется разработка соответствующей методологической базы.

В соответствии с этим определены следующие **задачи исследования**:

- 1) разработать методику автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков, включающую современные технологии и подходы к построению информационных систем;
- 2) разработать математическое обеспечение системы автоматизированного проектирования типорядов резинокордовых патрубков;
- 3) разработать алгоритм численной оптимизации типоряда изделий;
- 4) реализовать методику проектирования и алгоритм оптимизации изделий в виде подсистемы САПР;
- 5) провести апробацию разработанной подсистемы.

Глава 2. Разработка методики автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков

Приведенный в главе 1 анализ современных технологий, использующихся при разработке САПР, показал, что наибольшими возможностями по расширению функционала существующих САПР обладают технологии искусственного интеллекта. Более того, с большой долей уверенности можно сказать, что через некоторое время на рынке не останется САПР, не использующих подсистемы искусственного интеллекта в своём составе. Таким образом, при разработке новой САПР целесообразно предусмотреть в её составе интеллектуальные подсистемы. Место и функционал этих подсистем должна определять методика проектирования изделий в целом.

2.1 Формализация проектирования резинокордовых патрубков

При проектировании сложных изделий машиностроения применяется, как правило, нисходящий подход к проектированию [72].

Также необходимо отметить, что, хотя в современной технике гибкие оболочки по типу резинокордовых патрубков применяются весьма широко, они содержат одни и те же конструктивные элементы (бортовая часть, силовой каркас, герметизирующий слой) [73]. Это позволяет предположить, что и методика проектирования РКП может быть сравнительно универсальной.

Рассмотрим уровни абстракции, на которых может происходить описание объекта проектирования при использовании нисходящего подхода (рисунок 2.1).

Вспомним также классическое определение проектирования: *«создание, преобразование и представление в принятой форме образа еще не существующего объекта»* [72].



Рис. 2.1. Уровни абстракции при описании объекта проектирования

Учитывая схему, приведенную на рисунке 2.1, термины «создание», «преобразование» и «представление в принятой форме» можно заменить на более универсальное «описание объекта на конкретном уровне абстракции». Соответствующее определение проектирования будет следующим: *проектирование – это процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание*. При этом могут быть использованы промежуточные описания. В соответствии с рисунком 2.1, проектное решение, сформулированное на одном уровне проектирования, будет являться входными данными для проектирования на следующем уровне.

Достоинством такого определения является то, что его легче формализовать. Каждому уровню абстракции поставим в соответствие формальную математическую модель вида $M = [P_1, P_2, \dots, P_n, S_1, S_2, \dots, S_k]$, где P_n – параметры модели, S_k – соотношения между параметрами. Данные модели позволяют наглядно представить проектирование как процесс перехода между уровнями абстракции (см. рисунок 2.2). Конкретное содержание моделей M может не рассматриваться при составлении методики проектирования. Необходимо учитывать, при этом модели должны соответствовать требованиям адекватности, точности, универсальности и экономичности [75]. Кружками показаны не математические модели, а конкретные точки/наборы параметров в пространстве, относящиеся к данному уровню проектирования.

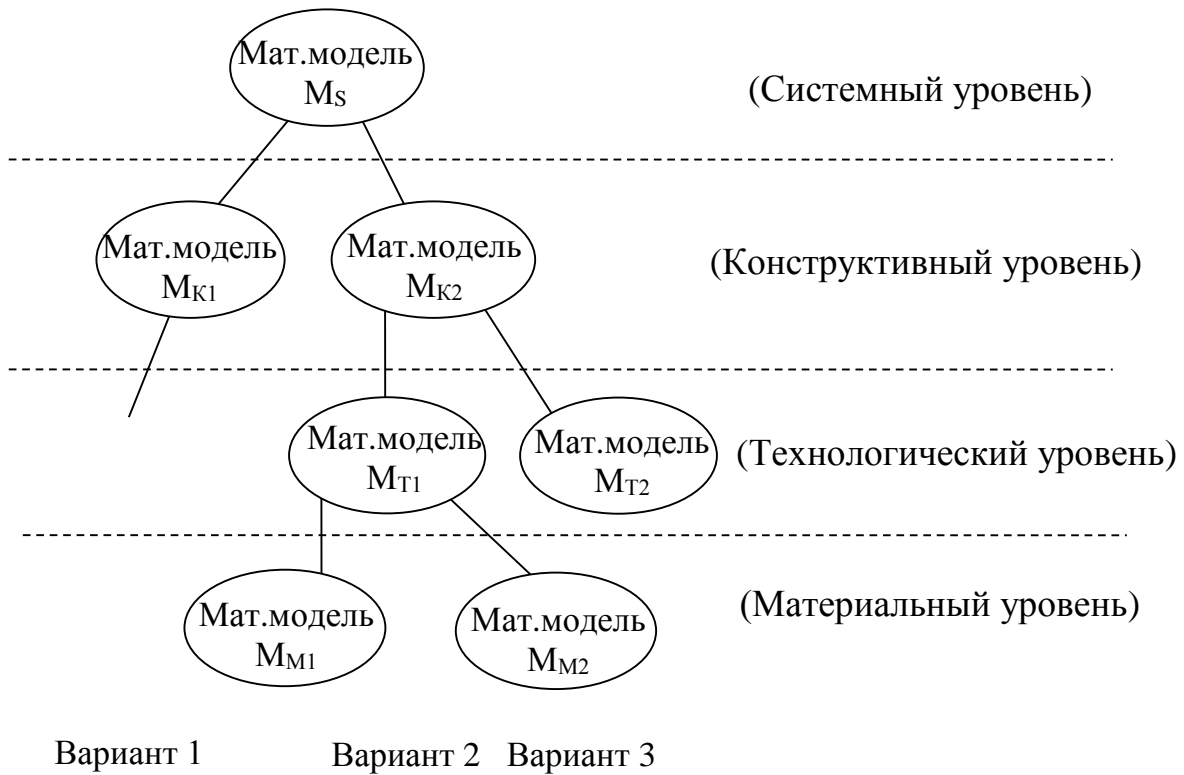


Рис. 2.2. Процесс проектирования изделия как последовательный переход между формальными моделями

Поскольку каждая из моделей оперирует различными параметрами (представляет собой связи в пространстве параметров на конкретном уровне), но представляет один и тот же объект, можно заключить, что в процессе проектирования эти параметры отображаются из одного пространства в другое. Данные параметры не являются взаимоисключающими, поэтому можно объединить их в одном пространстве, присвоив индексы, обозначающие принадлежность к какому-либо уровню/подпространству. Получим следующее уточнения определения: *проектирование – это последовательное отображение параметров объекта на одном уровне проектирования в параметры более низкого уровня.* Термин «отображение» означает, к примеру, что материальное исполнение объекта проектирования в конечном счёте определяется изначальными требованиями к объекту (и наличием тех или иных материалов), а все параметры конструкции и

технологии его изготовления являются только промежуточными представлениями. Выбрав средства автоматизации каждого из шагов, приведенных на рисунке 2.2, можно получить методику автоматизации проектирования.

Кроме того, полученная схема позволяет дать обоснование некоторых рекомендаций по организации процесса проектирования, выработанных самой инженерной практикой. В первую очередь – рекомендации по степени компетентности лиц, ответственных за принятие решений на системном и конструктивном уровнях. Из рисунка видно, что первый вариант технологического решения оказался нереализуемым по соображениям технологичности. Причина, по которой проработка этого варианта не была остановлена на системном уровне – неверные решения на системном и конструктивном уровнях. Таким образом, лицо, принимающее решение на конкретном уровне проектирования, должно принимать решение с учётом знаний не только на данном уровне, но и на более низких уровнях [76]. Более подробно этот вопрос рассмотрен в разделе 2.2.

2.2 Выбор методов для шагов предложенной методики проектирования

Если на конструкторском и технологическом уровнях проектирование начинается после получения проектного решения с более высоких уровней, то начало проектирования на первом, системном уровне (то есть начало проектирования объекта вообще) носит более сложный характер. На практике, при проектировании технических объектов исходное описание объекта представляют в виде ТЗ, а окончательное описание – в виде комплектов КД. Также эти описания должны соответствовать определенным стандартам, что в классическом определении и подразумевается под «представлением в принятой форме». Техническое задание в свою очередь формулируют исходя из потребностей практики, а анализ потребностей практики требует использования специализированных инструментов. С точки зрения методологии проектирования,

данный вопрос относится к области функционального проектирования. Функционируя в технической среде, изделие выполняет определенную функцию, что может быть проиллюстрировано рис. 2.3.

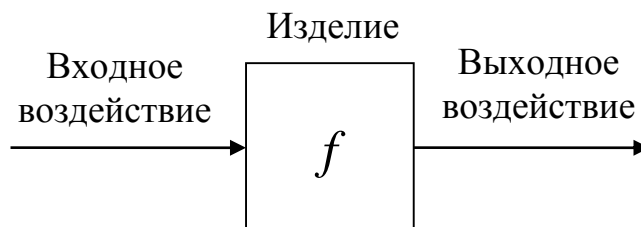


Рис. 2.3. Функционирование изделия в технической среде

Функциональное проектирование – проектирование, обеспечивающее определённый закон преобразования (функцию) входного воздействия в выходное.

Проектирование изделия машиностроения часто начинают с геометрической модели: заготовки, изделия-аналога, имеющихся у конструктора представлений о физическом воплощении будущего объекта, то есть с конструкторского или технологического аспекта изделия. При этом обеспечение необходимых характеристик изделия достигается постепенным приближением к ним характеристик прототипа. Более рациональным будет проектирование, изначально основанное на обеспечении заданных функций объекта в окружающей его технической среде.

Функциональное описание объектов проектирования и их взаимодействия осуществляют в рамках математического моделирования, поэтому при функциональном проектировании математическое моделирование играет особую роль. Наглядным примером являются САПР изделий радиоэлектроники, где этап функционального проектирования практически полностью автоматизирован [77]. Такая высокая степень автоматизации объясняется развитым аппаратом математического моделирования в области электроники: теория графов, математическая логика, различные разделы информатики позволяют полностью моделировать даже такие сложные объекты цифровой промышленности как

современные процессоры. Дополнительными факторами являются конкретизация всех входных и выходных переменных; малый разброс параметров компонентов и процессов системы. Без применения развитых принципов функционального проектирования было бы невозможно создание столь сложных технических устройств как последние поколения электронно-вычислительных машин и больших интегральных схем [78].

Область машиностроения является гораздо более разнообразной, поэтому автоматизация функционального проектирования изделий, подобных РКП, в настоящее время затруднительна. Отметим лишь возможные пути такой автоматизации:

- автоматизированный сбор информации о среде, в которой будет функционировать объект;
- ввод и расчёт требований к новому объекту;
- оценка сформированных требований (выполнимость, полнота, ранжирование);
- автоматизированная подготовка технической документации в виде технического задания или иного документа.

Отообразим на приведенной ранее схеме выбор методов функционального проектирования как способа формирования исходных данных; получим схему, показанную на рисунке 2.4.

После формулировки требований ТЗ методами функционального проектирования, они, в соответствии с полученным определением процесса проектирования, будут отображаться в пространство конструктивных, а затем технологических и материальных параметров. Известные методы оптимизации позволяют найти оптимальную точку в каждом из этих пространств параметров. Критерии оптимизации при этом должны выбираться с учётом требований к объекту на всех уровнях проектирования.

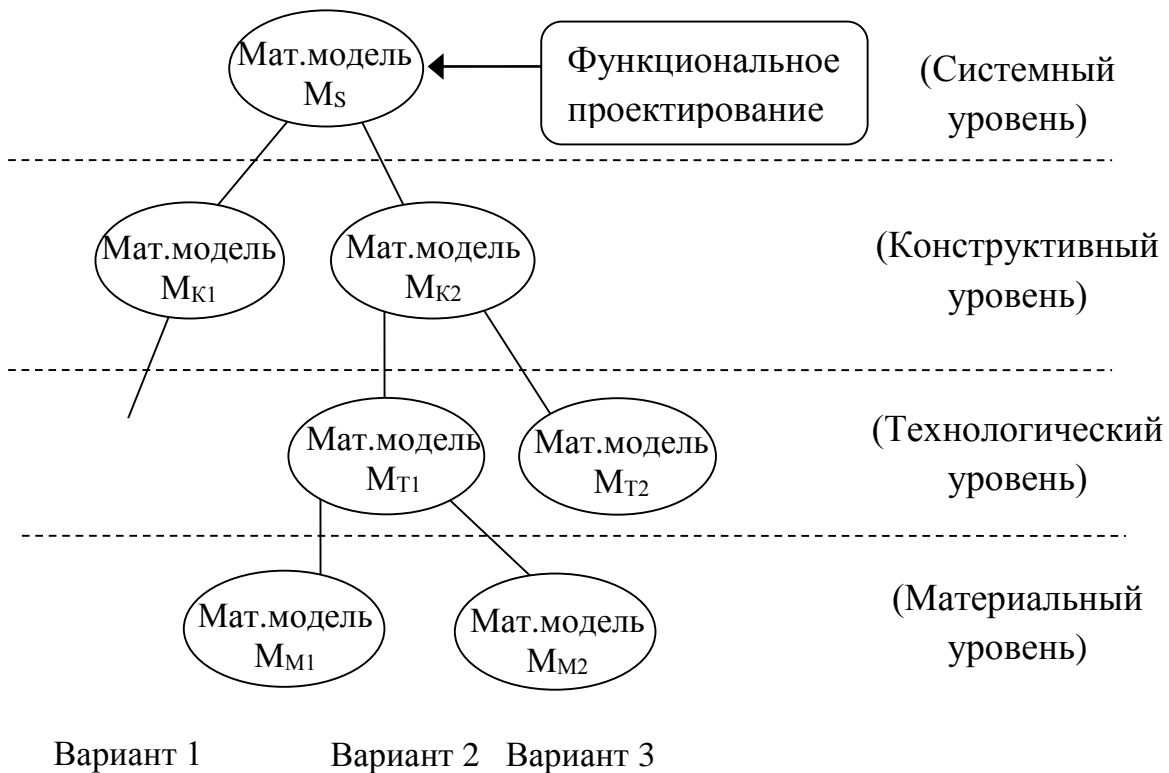


Рис. 2.4. Формирование требований методами функционального проектирования как первый шаг в методике проектирования РКП

Для дальнейшего уточнения приведенной на рисунке 2.4 схемы, кратко рассмотрим, какие методы оптимизации могут быть включены в методику.

В области проектирования РКП предложен алгоритм проектирования, сочетающий несколько вариантов автоматизации [79, 80]:

- разработка нескольких 2D-эскизов и выбор основного («легкие» САПР);
- построение геометрической модели по полученному эскизу («средние» САПР);
- построение сетки конечных элементов, создание расчётной модели (средства САЕ);
- анализ модели методами конечноэлементного анализа;
- анализ результатов (могут использоваться программные пакеты типа Excel, Mathcad или различные средства работы с базами данных);
- корректировки модели и повторные расчёты (при необходимости);
- выполнение чертежей изделия («средние» САПР).

В [80] описан опыт соответствующего применения пакета ANSYS. Схожий подход описан в [81].

К достоинствам описанного метода можно отнести только его простоту. Основными недостатками являются трудоёмкость, необходимость использования достаточно мощных технических средств, сложность дальнейшего повышения степени автоматизации, отсутствие взаимосвязи с другими уровнями проектирования.

В САПР для решения задач оптимизации преимущественно применяют поисковые методы [82]. Из них методы глобального поиска почти не применяются [83]. Широко распространён *метод градиентного спуска*, относящийся к численным методам [84]. Метод подробно изложен в книге Б.Т. Поляка [85]. Его также можно использовать для задач оптимизации в бесконечномерных пространствах, в том числе для численного решения задач оптимального управления [86, 87].

Чуть менее широко на практике применяются эволюционные алгоритмы, однако их распространение постепенно увеличивается [88, 89]. Стоит также упомянуть, что, в сравнении с другими странами, количество публикаций по эволюционным алгоритмам на русском языке за последние годы невелико.

В обзорной работе [90] выделен алгоритм дифференциальной эволюции (Differential evolution, DE) как наиболее гибкий и эффективный. В работах [91-95] отмечается необходимость точной настройки параметров алгоритма для достижения приемлемой эффективности. С этой целью рядом авторов были предприняты дальнейшие исследования. В статье [95] рассматриваются более сложные алгоритмы мутаций, хотя существенное повышение эффективности было достигнуто только на сравнительно простых задачах. Наиболее точные оценки для требуемого коэффициента мутаций даны в работе [93], масштабирующего коэффициента F – в работах [96, 97]. Поскольку в процессе оптимизации по алгоритму DE целевая функция рассчитывается для многих наборов параметров независимо, вычисления могут быть легко распараллелены, что является дополнительным преимуществом алгоритма. Таким образом, преобразование моделей на всех последующих уровнях

проектирования целесообразно осуществлять методами численной оптимизации в едином пространстве параметров. Схема согласно рисунка 2.4 с соответствующими исправлениями показана на рисунке 2.5.

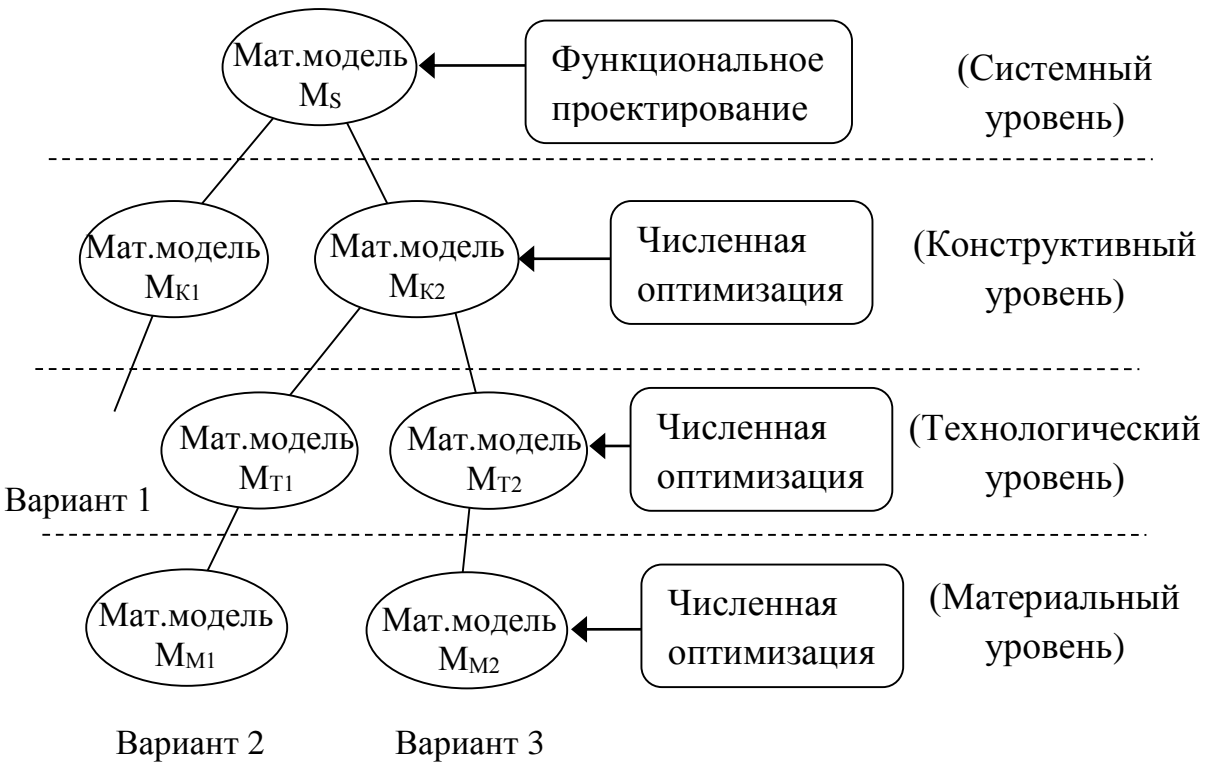


Рис. 2.5. Использование функционального проектирования и численной оптимизации в методике автоматизации проектирования РКП

Предлагаемая методика проектирования использует общее пространство параметров, поэтому задача оптимизации распространяется одновременно на несколько уровней проектирования. Среди классических работ, посвященных рассмотрению методологий решения сложных многокритериальных задач оптимизации, можно выделить работы [98], [99]. Как один из наиболее эффективных методов решения таких задач, хотя и обладающий своей спецификой, указан учёт предпочтений лица, принимающего решения, то есть методы, в современной классификации, относящиеся к инженерии знаний. Другим эффективным методом является класс адаптивных процедур. Данные процедуры позволяют свести процесс

проектирования к периодическому выбору решения из двух альтернатив. При этом исследователи творческой стороны процесса конструирования отмечают, что множество вариантов конструкции итак имеется в воображении конструктора [100].

Таким образом, две описанные эффективные методологии совместно, хотя и неосознанно, применяются в практике конструирования, при *использовании конструктором знаний из различных инженерных областей*. Такая работа со знаниями позволяет специалисту неявным образом решать задачу многокритериальной оптимизации объекта проектирования. Использование инженерии знаний для решения проблемы перехода между уровнями проектирования приведено на дополненной схеме (рисунок 2.6). Согласно рисунка 2.6, алгоритм проектирования изделия будет заключаться в последовательном применении методов функционального проектирования, численной оптимизации и инженерии знаний.

Саму методику проектирования можно определить следующим образом:

1. Изучение предметной области, составление перечня требований к изделию на системном уровне в виде модели M_S методами функционального проектирования.
2. Выбор конструкции изделия методами инженерии знаний, получение модели изделия на конструктивном уровне (M_K).
3. Численная оптимизация конструкции изделия.
4. Выбор технологии изготовления изделия методами инженерии знаний, получение модели изделия на технологическом уровне (M_T).
5. Численная технологии изготовления изделия.
6. Выбор материального исполнения изделия методами инженерии знаний, получение модели изделия на материальном уровне (M_M).
7. Численная оптимизация материального исполнения изделия.

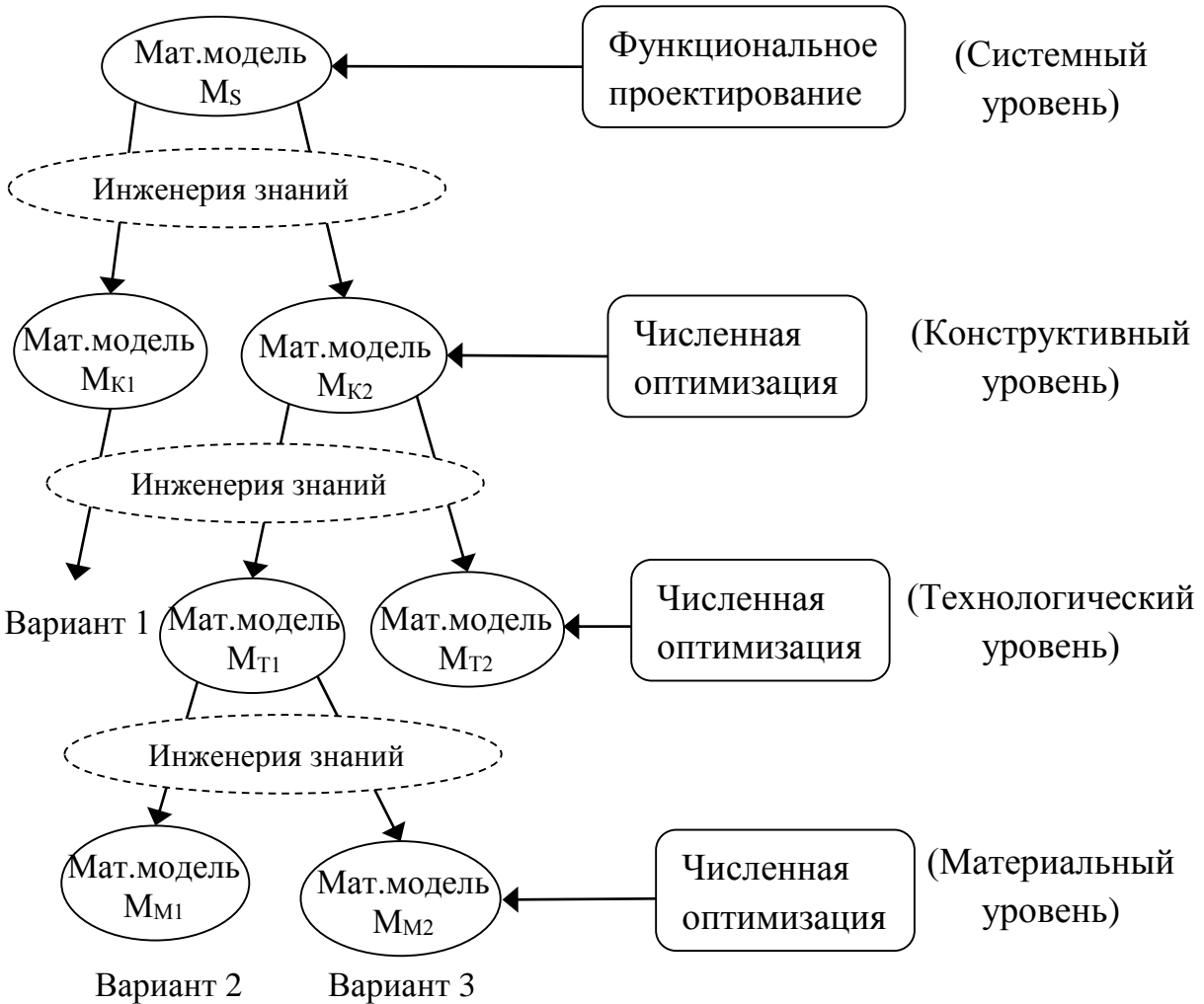


Рис. 2.6. Использование инженерии знаний в методике автоматизации проектирования РКП

2.3 Методика проектирования типорядов изделий

На основе алгоритма проектирования одного изделия типоряда можно получить методику проектирования типоряда в целом. Благодаря тому, что в рассмотренных в разделе 2.2 методах генетической оптимизации параметры конструкции могут быть представлены отдельными элементами генетического кода, процесс проектирования типоряда можно представить как циклическое обновление базы знаний, содержащей модели изделий, по результатам их численной

оптимизации и экспертной оценки. Графическое представление данной методики приведено на рисунке 2.7. Поскольку изделия типоряда отличаются, как правило, только по одному-двум параметрам, целесообразно применять метод, в котором процесс оптимизации не будет запускаться заново для каждой конструкции. Это обеспечивает проектированию типорядов преимущества в сравнении с отдельным проектированием изделий:

- сокращение суммарного времени оптимизации изделий типоряда;
- единообразие технических решений в изделиях.



Рис. 2.7. Методика проектирования типоряда изделий

Выводы по главе 2

В главе 2 сформулировано определение проектирования как последовательного отображения параметров объекта на одном уровне проектирования в параметры более низкого уровня, предложена методика автоматизации проектирования РКП и на основании неё - методика автоматизации проектирования типорядов РКП.

Как показано в главе 2, при использовании абстрактных математических моделей процесс проектирования, в соответствии со сформулированным определением, может быть представлен в виде схемы, обладающей наглядностью и информативностью.

Существенным отличием предложенной методики проектирования типорядов является корректировка целевой функции при проектировании изделий типоряда без перезапуска процесса оптимизации. На основании сформулированного определения предложено объединить все пространства параметров, на которых происходит оптимизация изделия, в единое пространство, что упрощает применение эффективных методов численной оптимизации.

Области применения методов решения подзадач проектирования, входящих в предложенную методику, чётко разграничены, что также показано на приведенных схемах. В том числе, в рамках выполнения задачи диссертации по внедрению современных технологий и подходов, впервые в составе общей методики проектирования указана область применения методов искусственного интеллекта, а именно инженерии знаний. При этом использование знаний на этапе перехода между уровнями проектирования соответствует существующей инженерной практике, т.е. при предложенном подходе автоматизация может быть осуществлена без кардинального изменения рабочих процессов предприятий.

При внедрении автоматизации проектирования РКП, отображение параметров между моделями может быть заменено принятием решения человеком и позже введено в процесс проектирования без его изменения. Автоматизация этапа функционального проектирования мало актуальна для проектирования РКП, поскольку техническое задание на РКП, как правило, формируется заказчиком без участия исполнителя. Таким образом, для практической реализации предложенной методики необходимо разработать алгоритм численной оптимизации РКП и программную реализацию алгоритма и методики.

Глава 3. Математическое обеспечение проектирования резинокордовых патрубков

Выполнение проектных операций и процедур в САПР основано на оперировании математическими моделями [101]. Наличие математической модели не только ускоряет процесс проектирования, но и позволяет инженерам-проектировщикам использовать ММ независимо от самой САПР. В главе 2 понятие проектирования было определено через формальные модели объекта. Глава 3 посвящена конкретизации формальных моделей РКП на функциональном, конструктивном, технологическом и материальном уровнях. Математическая модель объекта отражает только часть его свойств, т.е. кроме получения функциональных зависимостей между параметрами и т.д. ММ формулируется на основе допущений, ограничивающих область учитываемых в ММ параметров реального объекта. Данные допущения выделены в главе курсивом и пронумерованы.

Кроме того, ММ патрубка составлена с учётом только гидростатического воздействия внутренней среды. Такая постановка расчётной задачи обусловлена тем, что РКП эксплуатируются на участках трубопроводов с ламинарным потоком однородной жидкости при относительно малых скоростях потока. Хотя одним из основных назначений РКП является виброизоляция, т.е. работа в условиях вибраций, при заранее оговоренных сроках замены РКП основной причиной выхода из строя являются пиковые гидростатические нагрузки.

Другим ограничением рассматриваемой модели является диапазон рабочих температур. Хотя задачи разработки РКП для таких климатических зон как тропики и крайний север также являются актуальными, вероятные пути их решения связаны преимущественно с созданием новых рецептур резин. Комплексное рассмотрение технического задания, конструкции, технологии и материального исполнения будет играть значительно меньшую роль в расширении температурного диапазона эксплуатации РКП. В рассматриваемых математических моделях предполагается использование распространённых рецептур, обеспечивающих успешную эксплуатацию РТИ в пределах от +5 до +80 °С.

3.1 Математическая модель патрубка на системном уровне и общие зависимости на конструктивном уровне

Результатом функционального проектирования, либо анализа имеющегося технического задания является список параметров, которым должен соответствовать проектируемый объект. Такой список может рассматриваться как математическая модель РКП на наиболее высоком уровне проектирования - системном. На основании анализа различных технических заданий на проектирование РКП [102], выделены следующие основные требования:

- максимальное давление рабочей среды, МПа (P);
- коэффициент запаса прочности (μ);
- диаметр условного прохода, см (D_y);
- длина, см (L);
- надёжность, % (ψ);
- гарантийный срок эксплуатации, лет (S_T);
- тип рабочей среды (p_1);
- работа на вакуум (p_2);
- максимальная разрешенная масса, кг (S_M);
- максимальная стоимость, руб. (S_C).

Анализ литературы выявил, что одним из важных параметров гибких оболочек является также статическая и динамическая жесткость [103-106]. Однако практический опыт использования РКП показывает, что при достаточно большой длине полимерной стенки жесткость РКП в любом случае в несколько раз ниже жёсткости других типов вставок трубопроводов. В области проектирования РКП уточненный расчет жесткости необходим для выполнения специальных требований, которые в данной работе не рассматриваются. При необходимости предложенная методика проектирования может быть дополнена возможностями универсального ПО для моделирования и анализа как показано в работе [107].

Таким образом, математическая модель РКП на системном уровне представляется списком параметров:

$$Ks = \{P, \mu, D_y, L, \psi, S_T, p_1, p_2, S_M, S_C\}, \quad (3.1)$$

где P – рабочее давление патрубка, кг/см²;

μ – коэффициент запаса прочности;

D_y – диаметр условного прохода, см;

L – общая длина патрубка, см;

ψ – надёжность патрубка;

S_T – гарантийный срок эксплуатации, лет;

p_1 – тип рабочей среды

p_2 – работа на вакуум

S_M – масса патрубка, кг;

S_C – стоимость патрубка, руб.

Данная формулировка ММ основана на следующем допущении:

допущение 1: параметры РКП на системном уровне не связаны между собой (независимы друг от друга).

Для упрощения дальнейшей работы с моделью, тип рабочей среды удобно задавать номером из списка: {1 вода, 2 воздух, 3 морская вода, 4 нефть}. Работа на вакуум: {0 нет, 1 да}.

Отметим, что в главе 2 было предложено численно оптимизировать конструкции РКП на каждом уровне. Для обеспечения сходимости процесса оптимизации, кроме аналитических зависимостей между параметрами необходимо определить диапазон допустимых значений параметров. Ограничения для рассмотренных выше параметров приведены в таблице 3.1. Ограничения для рассматриваемых далее параметров приводятся после аналитических зависимостей между этими параметрами.

Таблица 3.1. Ограничения параметров конструкции на системном уровне

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение	Примечание
P	кг/см ²	300,0	0	
μ	-	4	1,5	
D_y	см	150,0	5,0	
L	см	1000,0	40,0	
ψ	-	0,9999	0,999	
S_T	лет	15	3	
p_1	-	-	-	вода/воздух/ морская вода/масло
p_2	-	1,0	0	1 – да, 0 – нет
S_M	кг	300,0	1,0	
S_C	руб.	2 000 000	1000	

В соответствии с принятым в гл. 2 определением процесса проектирования, ММ системного уровня далее должна быть преобразована в ММ конструктивного уровня.

Расчет общих параметров конструктивного уровня изложен в [18]: вначале рассмотрим расчётную схему РКП. Нагрузка от внутреннего давления P распределяется на силовой каркас и бортовую заделку согласно расчётной схеме, показанной на рис. 3.1: составляющая F_d , называемая также продольной или осевой нагрузкой, обусловлена равновесием каждого продольного сечения РКП; составляющая F_k , называемая радиальной нагрузкой – воздействием давления на силовой каркас и его соответствующим натяжением.

Допущение 2. Продольная нагрузка F_d на РКП воспринимается только бортовой заделкой РКП, а радиальная – только силовым каркасом.

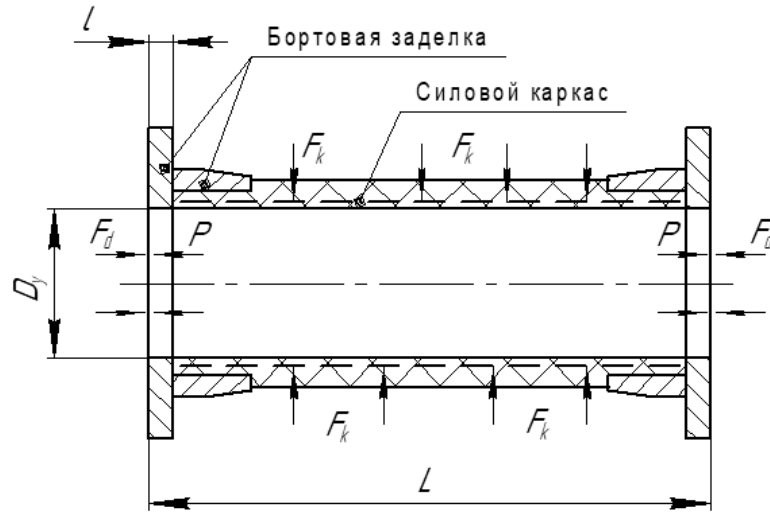


Рис. 3.1. Расчётная схема РКП

В соответствии с приведенными определениями запишем:

$$F_d = P \frac{\pi D_y^2}{4} \quad (3.2)$$

$$F_k = P \cdot 2\pi \frac{D_y}{2} h, \quad (3.3)$$

где h – длина свободной части РКП.

Тогда нагрузка F_k на единицу длины:

$$F_k' = P \cdot 2\pi \frac{D_y}{2}. \quad (3.4)$$

Работоспособность конструкции по критерию прочности зависит от её способности без разрушения воспринимать действующие нагрузки [108], поэтому параметры конструкции должны определяться усилиями F_d и F_k . Это означает, что, учёт формул (3.2) и (3.4), параметры конструкции РКП по условиям прочности определяются только двумя параметрами системного уровня – рабочим давлением и условным диаметром внутреннего сечения.

Необходимо отметить, что формула (3.2) нуждается в уточнении. РКП является сравнительно гибкой конструкцией, в связи с этим подача давления P может изменить его геометрические параметры – прежде всего длину и диаметр [109]. Причиной этого является переход нитей силового каркаса в равновесное состояние, при котором усилие от внутреннего давления P полностью воспринимается нитями корда [110]. Контроль изменений углов нитей РКП под действием внутреннего давления является достаточно актуальной технической задачей [111]. Равновесным состоянием является расположение нитей под углом $54^{\circ}44'$ к оси РКП [112].

В случае если начальный угол отличается от равновесного, зависимость по формуле (3.2) необходимо умножить на дополнительную составляющую [109]:

$$F_d = P \frac{\pi D_y^2}{4} \left(1 + \frac{2}{tg^2 \beta} \right), \quad (3.5)$$

где β – угол между нитью и меридианом поверхности РКП. Отрицательным будет направление сжатия РКП под действием давления P , положительным – направление растяжения.

Как уже сказано, отклонения параметра β от оптимального (равновесного) значения вызваны технологическими причинами, которые могут быть устранены при налаживании серийного производства РКП. По этой причине, для предварительного расчета прототипов можно принять угол β равным равновесному.

Зная полную нагрузку на бортовую заделку, можно произвести прочностной расчёт фланцевого соединения РКП при его монтаже в трубопровод по известным методикам, включая ГОСТ [113], [114].

Нагрузка по формуле (3.5) воспринимается болтами крепления РКП в количестве i_n . Условие прочности болтов диаметром n из расчёта на каждый болт определяется по известным формулам сопротивления материалов [115] с коэффициентом запаса 1.3:

$$n = \sqrt{\frac{1.3 \cdot 4 F_d}{i_n \sigma_{0.2} \pi}}. \quad (3.6)$$

где $\sigma_{0.2}$ – предел текучести материала болтов.

Толщину l присоединительных фланцев РКП необходимо выбирать из данных по ГОСТ в соответствии с D и рабочим давлением [116].

Остальные параметры системного уровня определяют тип конструкции с учётом её работоспособности по другим критериям – надёжности и т.д. Однако если, к примеру, зависимость толщины фланца РКП от давления в трубопроводе может быть выражена аналитически средствами механики твёрдого тела, то аналитическая зависимость типа конструкции от требуемой величины её надёжности, срока службы и т.д. в настоящее время не определена [117]. С целью решения данной проблемы был проведен анализ существующих конструкций РКП [118]. По результатам анализа выделено 6 типовых конструкций, рассмотренных далее.

Допущение 3. Любая конструкция РКП, проектируемая с целью использования в конструкциях общего машиностроения на современном уровне техники, может быть сведена к одному из 6 рассмотренных типов, либо будет иметь характеристики не лучше характеристик одной из рассмотренных конструкций.

В главе 2 было предложено решать задачу отображения параметров системного уровня в параметр «тип конструкции» методами обработки знаний, поэтому в главе 3 математические модели конструкций каждого типа будут рассмотрены отдельно.

В случае проектирования новой конструкции, её надёжность нуждается в точном расчёте. К примеру, в [119] предлагаются модели надёжности «параметр - поле допуска» и «нагрузка - несущая способность». Однако в случае рассматриваемых конструкций РКП конструкции апробированы, изделия на их основе поставляются серийно, надёжность изделий подтверждена расчётными и экспериментальными методами [120]. Таким образом, все проектируемые конструкции РКП имеют надёжность не менее 0,99 в пределах установленного гарантийного срока службы.

Запишем уравнения, общие для всех конструкций.

Уравнение 1. Задаваемый ТЗ диаметр условного прохода патрубка должен соответствовать ГОСТ 28338-89 «Соединения трубопроводов и арматура. Номинальные диаметры. Ряды», то есть выбирается из ряда DN :

$$D_y \in DN. \quad (3.7)$$

Уравнение 2. Во всех рассматриваемых конструкциях герметичность РКП обеспечивается герметизирующим слоем или камерой, толщина s которых зависит от требуемого срока службы РКП в годах (S_T). Эмпирическая формула имеет вид:

$$s = 0.2S_T. \quad (3.8)$$

Уравнения 3 и 4. Параметрами ТЗ являются среди прочих параметры массы S_M и стоимости S_C . Масса и стоимость РКП в свою очередь определяются его конструкцией. Поскольку параметры конструкции зависят только от рабочего давления и диаметра проходного сечения, уравнения для определения массы и стоимости будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} S_M &= PD_y \cdot k_m, \\ S_C &= PD_y \cdot k_c, \end{aligned} \quad (3.9)$$

где k_m и k_c – коэффициенты, зависящие от выбранного типа конструкции.

Патрубки рассматриваемых конструкций поставляются серийно, поэтому коэффициенты k_m и k_c могут быть определены методом статистической обработки данных по осуществлённым поставкам. К примеру, сравнительно простым является поиск среднего арифметического X_{cp} значений X_i на доверительном интервале с границами β_1 и β_2 [121]:

$$X_{cp} = \frac{1}{N} \sum X_i; \quad (3.10)$$

$$\beta_1 = \frac{X_{\max} - \bar{X}}{S_x \sqrt{(N-1)N}}; \quad (3.11)$$

$$\beta_2 = \frac{\bar{X} - X_{\min}}{S_x \sqrt{(N-1)N}}, \quad (3.12)$$

где N – размер просеянной выборки;

X'_i – члены просеянной выборки;

X_{\max} – максимальное значение в просеянной выборке;

X_{\min} – минимальное значение в просеянной выборке;

\bar{X} – математическое ожидание;

S_x – среднее квадратичное отклонение.

Уравнение 5. Прочность силового каркаса РКП связана с его характеристиками известной формулой [122]:

$$\mu = \frac{2i \cdot i_k \sin^2 \beta}{D_{yP}} J N_{\text{разр}}, \quad (3.13)$$

где μ – коэффициент запаса прочности патрубка;

J – технологический коэффициент снижения запаса прочности;

P – давление во внутренней полости РКП;

$N_{\text{разр}}$ – разрывная нагрузка нити;

i – число слоев корда;

i_k – плотность нитей корда;

θ , рад – угол наклона нитей кордной ткани к оси патрубка.

Поскольку число слоёв на этапе технологической проработки изделия еще не известно, упростим формулу (3.13):

$$\mu = \frac{2N_n \sin^2 \beta}{D_{yP}} J N_{\text{разр}}, \quad (3.14)$$

где N_n – число нитей на 1 см длины сечения патрубка.

Толщина стенки РКП t определяется способом его сборки и практически не влияет на рабочие характеристики, однако её фактическое значение ограничено числом слоёв корда i (все серийные корда имеют толщину до 2 мм) и наличием покровного слоя толщиной до 4 мм:

$$t \leq 2i + 4. \quad (3.15)$$

Число i_n , диаметр n и расположение d_n присоединительных болтов РКП определены по ГОСТ [116] и выбираются из ряда в зависимости от рабочего давления РКП.

Остальные параметры конструктивного уровня относятся к конструкции бортовой заделки и вакуумной арматуры и зависят от значений параметров «номер конструкции борта» и «номер конструкции вакуумной арматуры».

Таблица 3.2. Ограничения общих параметров конструкций

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение	Примечание
F_d	кг	150 000,0	0	
F'_k	кг	24 000,0	0	на ед. длины
β	град.	180	0	
s	см	0,3	0,06	
k_m	-	0,5	0,05	константа
k_c	-	265	1	константа
J	-	0,85	0,5	константа
$N_{разр}$	кг/см ²	500,0	50,0	
i	шт.	6	2	
i_k	шт./см	8	1	
N_n	шт./см	48	2	на ед. длины
t	см	1,6	0,2	
i_n	шт.	22	4	
n	см	3,6	1,2	
d_n	см	45,0	6,5	

3.2 Математическая модель типовых конструкций патрубков

В главе 1 по результатам патентных исследований была предложена сравнительно полная классификация конструкций РКП. Однако полный учет всех возможных вариантов потребует добавления в модель более 100 параметров. С целью сокращения количества возможных параметров, из всех проанализированных конструкций было выбрано шесть наиболее распространённых:

Конструкция №1

Выдерживаемая нагрузка F_d определяется прочностью привулканизации S_s резинокордной части патрубка по поверхности привулканизации шириной k :

$$F_d = S_s \pi (D_y + 2t_k)k. \quad (3.16)$$

Монолитность стенки патрубка, удерживаемой прочностью связи S_s (отсутствие сдвиговых деформаций и расслоений), обеспечивается прочностью связи между слоями резины и силового каркаса S_k по всей площади цилиндрической части k :

$$S_k \geq S_s. \quad (3.17)$$

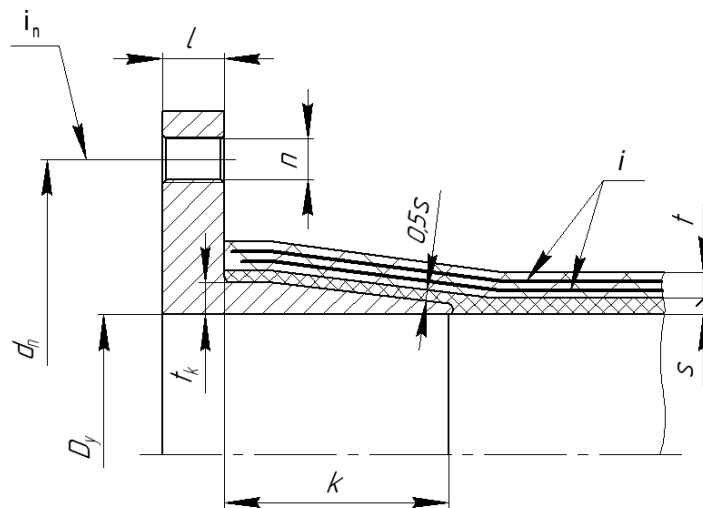


Рис. 3.2 – Эскиз конструкции № 1

Небольшой конус на поверхности привулканизации увеличивает её площадь на длине k , увеличивая таким образом запас прочности.

Формула (3.16) необходима и достаточна для обеспечения монолитности стенки при двух допущениях:

допущение 4 - стенка патрубка не изменяет своих геометрических размеров при изменении давления P ;

допущение 5 - все контактные взаимодействия между слоями резины и корда являются идентичными (прочность связи между первым слоем резины и первым слоем корда равна прочности связи между любыми последующими слоями) [118].

Длина h свободной части РКП:

$$h = L - 2(k+l). \quad (3.18)$$

Толщина втулки t_k может быть определена по формуле Барлоу для расчета трубы на прочность под действием внутреннего давления [123]:

$$t_k = \frac{PD_y}{2\sigma_{0.2}}, \quad (3.19)$$

где $\sigma_{0.2}$ – предел текучести материала детали.

Толщина фланца l может быть определена по ГОСТ для фланца с соответствующим D_y и P [116].

Ограничения параметров приведены в таблице ниже.

Таблица 3.4. Ограничения параметров, специфические для конструкции № 1

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение	Примечание
S_s	кг/см ²	110,0	10,0	
k	см	6,0	0,5	
t_k	см	0,5	0,2	
S_k	кг/см ²	110,0	10,0	
l	см	5,0	1,0	

Конструкция №2

Конусная втулка насажена на наружную поверхность резинокордной части патрубка и обжимает её в области привулканизации. Благодаря этому, нагрузка F_d уравнивается не только прочностью привулканизации, но и усилием обжатия F_q : Толщина втулки в соответствии с требованием по равнопрочности всех элементов конструкции равна толщине t_k , т.е. формула для усилия F_d имеет следующий вид:

$$F_d = S_s \pi (D_y + 2t_k) k + \mu_t F_q \pi (D_y + 2t_k) k, \quad (3.20)$$

где μ_t – коэффициент трения резинокорда по металлу фланца.

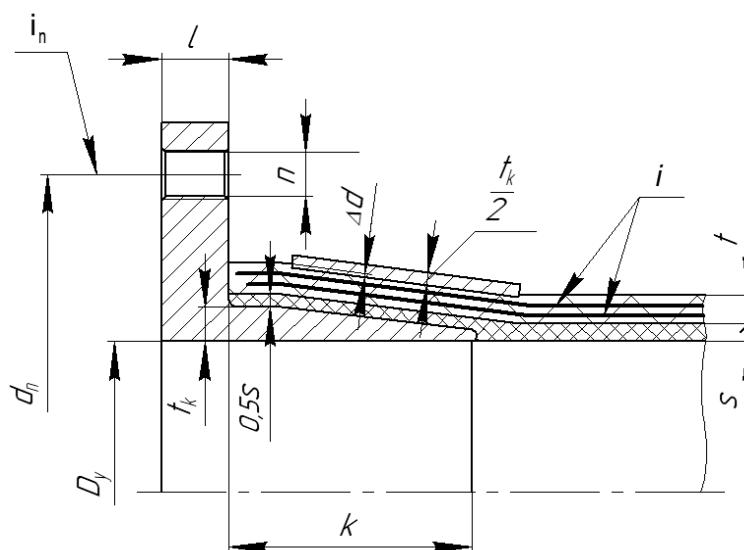


Рис. 3.3. Эскиз конструкции № 2

Для толщины втулки t_k ранее приведена формула (3.19).

Поскольку резинокордная стенка при большом сжатии будет проявлять свойство несжимаемости, а также поскольку расположение слоёв силового каркаса должно сохраняться при обжатии втулкой, величину обжатия необходимо ограничить. На практике максимальное значение обжатия ограничивают величиной в десять процентов [118]. Ограничения параметров приведены в таблице ниже.

Длина h свободной части РКП определяется ранее полученной формулой (3.18).

Таблица 3.5. Ограничения параметров, специфические для конструкции № 2

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение	Примечание
S_s	кг/см ²	110,0	10,0	
k	см	6,0	0,5	
t_k	см	0,5	0,2	
S_k	кг/см ²	110,0	10,0	
l	см	5,0	1,0	
μ_t	-	0,9	0,6	

Конструкция №3

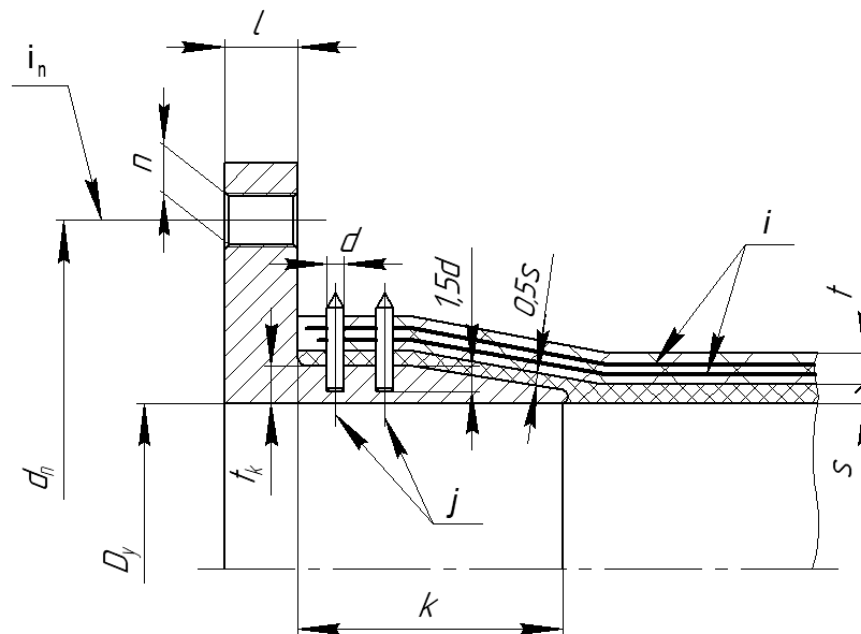


Рис. 3.4. Эскиз конструкции № 3

При расчёте данной конструкции, для повышения надежности патрубка можно принять, что нагрузка от внутреннего давления уравнивается только штифтами, в которых возникает усилие среза, а прочность связи между резиной и металлом внутренней втулки отсутствует. Примем следующие допущения:

- нагрузка между рядами штифтов перераспределяется на начальном этапе эксплуатации патрубка, и в процессе работы она распределена между всеми штифтами равномерно.

- количество штифтов достаточно для того, чтобы нагрузка была равномерно распределена между нитями силового каркаса без создания перенапряженных зон в области огибания каркасом штифтов и недонапряженных зон в области между штифтами. Штифты также не должны располагаться слишком близко друг к другу, чтобы не создавать излишнего разрежения силового каркаса. Практика показывает, что оптимальное расстояние между штифтами составляет около 30 мм [118].

Из второго допущения можно получить число штифтов в поперечном сечении:

$$j = \frac{\pi D}{30}. \quad (3.21)$$

Если полученное число штифтов не удовлетворяет требованиям прочности, увеличивается число рядов.

Условие равновесия конструкции:

$$P \frac{\pi D_y^2}{4} = j \frac{\pi}{4} d^2 \tau_{cp}. \quad (3.22)$$

где τ_{cp} – предел прочности материала штифтов на срез.

Глубина заделки штифтов равна полутора диаметрам штифта в соответствии с рекомендациями справочников по машиностроению [124]. Штифты могут быть смонтированы посадкой с натягом, либо на резьбе.

Ограничения параметров приведены в таблице ниже.

Таблица 3.6. Ограничения параметров, специфические для конструкции № 3

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение	Примечание
k	см	6,0	0,5	
t_k	см	2,0	0,5	
l	см	5,0	1,0	
d	см	1,0	0,3	
j	шт.	40	6	
τ_{cp}	кг/см ²	3500,0	1500,0	

Длина h свободной части РКП определяется ранее полученной формулой (3.18).

Конструкция №4

В данной конструкции корд удерживается за счёт заворота вокруг бортового кольца и прочности связи слоёв резины со слоями корда. При обороте гибкой нити вокруг неподвижной опоры величина удерживающей силы T определяется по формуле Эйлера [125]:

$$T = T_0 e^{-\mu_t \alpha}, \quad (3.23)$$

где α – угол охвата опоры нитью, рад.

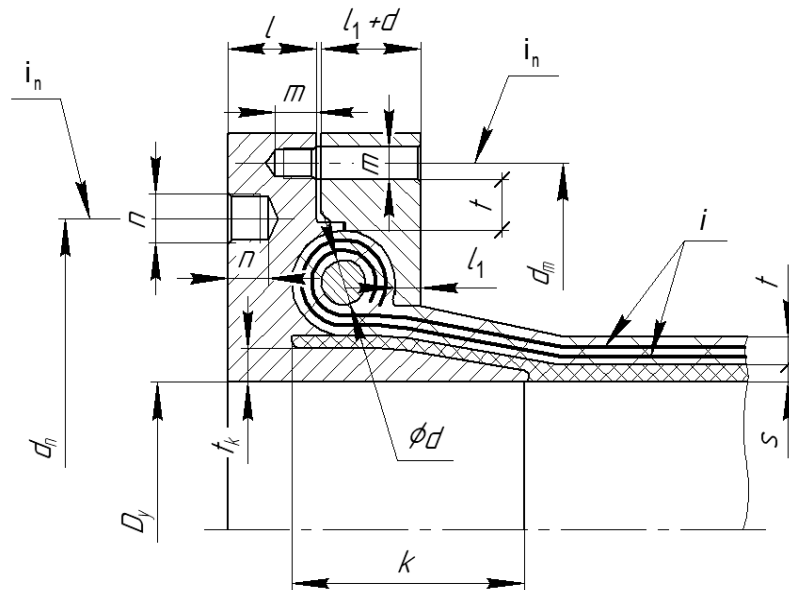


Рис. 3.5. Эскиз конструкции № 4

В рассматриваемой конструкции $\alpha = 3\pi/2$. Получаем:

$$T = F_a e^{-3\pi\mu_t/2}. \quad (3.24)$$

Удерживающей силой является усилие обжатия борта F_b болтами m с учётом коэффициента трения μ по аналогии с формулой (3.20). При контролируемой затяжке болтов создаваемое болтами усилие F_b можно установить равным двум

третьям от нагрузки, получаемой из расчёта болтов на прочность по аналогии с формулой (3.5):

$$F_b = \frac{2}{3} \frac{m^2 i_n \sigma_{0.2} \pi}{1.3 \cdot 4}. \quad (3.25)$$

Для обеспечения равномерного обжатия, число болтов m рекомендуется установить равным числу присоединительных болтов i_n [118].

Поверхность, на которой обжимаются силовые слои, является проекцией бортового кольца на плоскость фланца, поэтому окончательное выражение для удерживающей силы:

$$T = 2\pi\mu_t F_b \left[\left(\frac{D_y}{2} + s + t + d \right)^2 - \left(\frac{D_y}{2} + s + t \right)^2 \right]. \quad (3.26)$$

Описанное равновесное состояние конструкции возможно пока все элементы конструкции сохраняют свою геометрию. Из всех элементов наименьшее сечение имеет бортовое кольцо, поэтому оно должно быть дополнительно рассчитано на прочность и устойчивость. Известна формула критического усилия $q_{кр}$ для металлического кольца [126]:

$$q_{кр} = \frac{9}{2} \frac{E J_k}{R^3}, \quad (3.27)$$

где E – модуль упругости металла кольца;

J_k – момент инерции сечения кольца;

R – радиус средней линии кольца.

Модуль упругости E определяется физическими свойствами материала кольца. Известны различные конструкции бортовых колец, использующие проволоку, стальной прутки и т.д. [127]. Опыт проектирования и эксплуатации резинокордных изделий показывает, что выбор конкретного материала зависит от таких факторов как надежность изделия, частота и амплитуда прилагаемых нагрузок, возможность возникновения резонансов. РКП работают на малых и средних частотах, при этом они должны иметь высокую надежность, поскольку их рабочие давления могут достигать 10 МПа. Этим обусловлено использование в конструкциях бортовых колец РКП исключительно стального прутка. По технологическим соображениям

(прочность связи с резиной, обрабатываемость и т.д.) используются низколегированные стали, у которых модуль упругости не зависит от химического состава и равен 2,1 ГПа [128]. Таким образом, с целью упрощения можно принять параметр E постоянным и равным 2,1 ГПа.

Не технологично и нецелесообразно выполнять кольцо полым, поэтому момент инерции сечения будет определяться по известным формулам для сечения-окружности [129]:

$$J_k = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (3.28)$$

Поскольку формула (3.27) определяет критическое усилие, необходимо также ввести коэффициент запаса J , значение которого выбрано ранее согласно таблицы 3.2.

Радиус средней линии кольца можно определить через геометрию других элементов РКП:

$$R = D_y + 2t_k + s + t + d. \quad (3.29)$$

С учетом изложенного, запишем формулу для определения диаметра кольца d :

$$T = J \frac{9}{2} \frac{E \pi d^4}{(D_y + 2t_k + s + t + d)^3}. \quad (3.30)$$

Данная формула не определяет размер d непосредственно, однако если все остальные параметры известны, он легко может быть найден из неё, к примеру, численными методами. Задача численного определения размера d дополнительно упрощается, если принять его кратным размеру в половину миллиметра или более.

С целью минимизации габаритных размеров фланцев, глубина захода резьбы выбрана равной диаметру болтов крепления (см. рис. 3.5). Дальнейшее уменьшение глубины захода справочной литературой не рекомендуется.

Глубина отверстий крепления в соответствии с требованиями прочности должна быть не менее диаметра болта. Увеличивать её больше этого значения также нецелесообразно, поскольку это приведет к увеличению толщины фланца, т.е. металлоемкости РКП в целом. Данная зависимость между параметрами отражена на эскизе.

Размер d_m также определяется геометрией РКП:

$$d_m = D_y + 2t_k + s + 6t + 2d + m. \quad (3.31)$$

Длина h свободной части РКП определяется длиной k области привулканизации. В рассматриваемой конструкции область привулканизации расположена в проточке фланца, дно проточки для предотвращения излишнего ослабления сечения не должно располагаться ниже углублений под болты крепления РКП. Таким образом, длина h свободной части РКП определяется как

$$h = L - 2(k+n). \quad (3.32)$$

Ограничения параметров приведены в таблице ниже.

Таблица 3.7. Ограничения параметров, специфические для конструкции № 4

Параметр	Единица измерения	Максимальное значение	Минимальное значение	Примечание
k	см	8,0	1,0	
t_k	см	2,0	0,5	
l	см	5,0	1,0	
l_1	см	5,0	1,0	
d	см	2,0	0,8	
j	шт.	22	4	
m	см	5,4	1,0	
d_m	см	50,0	8,0	
μ_t	-	0,9	0,6	

Конструкция №5

Ширина прижимного фланца в конструкции 4 может быть увеличена так, чтобы увеличить длину бортовой заделки. Опыт изготовления РКП конструкции 4 показывает, что возможно изготавливать РКП с двумя последовательно расположенными бортовыми кольцами, и производить заворот силового каркаса вокруг одного, а затем вокруг другого кольца. За счёт этого общий угол заворота слоёв корда увеличивается вдвое:

$$T = F_d e^{-6\pi\mu t/2}. \quad (3.33)$$

Если принять, что удерживающая сила T определяется только силами трения борта по металлу фланца, можно снова воспользоваться для расчёта силы T формулой (3.26). Также можно уменьшить и диаметр бортового кольца d .

Как следует из формулы (3.23), теоретически увеличение угла α должно пропорционально снижать требуемую удерживающую нагрузку. На практике прочность такой конструкции оказывается меньше расчётной. Прежде всего, при потере устойчивости первым бортовым кольцом корд не будет удерживаться на втором бортовом кольце даже при выполнении условия его прочности, поскольку конфигурация РКП изменится, и нагрузка, передаваемая нитями, перестанет быть равномерно распределённой по диаметру второго кольца. Кроме того, в данной конструкции борта больше доля податливого резинокорда по сравнению с металлом, поэтому изменение натяжения нитей под действием внутреннего давления РКП сравнительно легко перемещает первое бортовое кольцо относительно второго. Перемещение кольца нарушает устанавливаемые в расчёте начальные условия (геометрию борта, предварительно созданные напряжения и т.д.) и может сильно влиять на прочность борта [118]. Ограничения параметров приведены в таблице ниже.

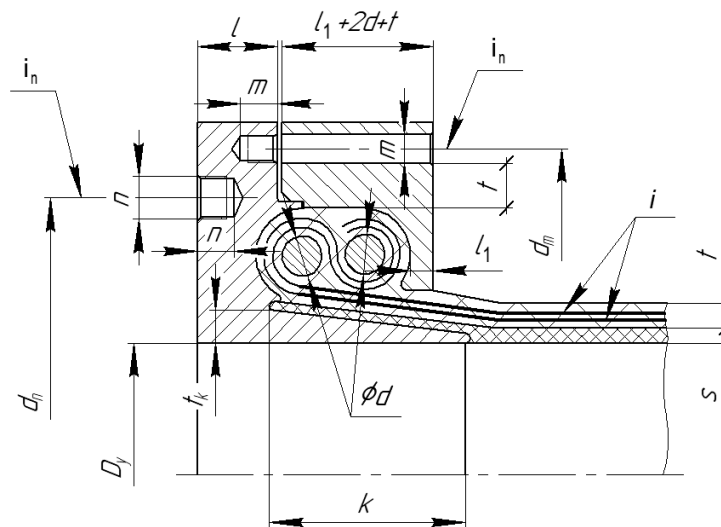


Рис. 3.6. Эскиз конструкции № 5

После заворота слоев корда вокруг первого бортового кольца усилия на нитях уменьшаются, поэтому диаметр второго бортового кольца может быть меньше диаметра первого. Однако уменьшение диаметра БК сопряжено с технологическими сложностями – не обеспечивается взаимозаменяемость первого и второго колец при сборке, усложняется заворот корда вокруг кольца с малым диаметром. В связи с этим, на практике применяются кольца, имеющие одинаковые диаметры, как показано на рисунке 3.6.

Расчет размера d_m производится по ранее полученной формуле (3.31).

Таблица 3.8. Ограничения параметров, специфические для конструкции № 5

Параметр	Единица измерения	Максимальное значение	Минимальное значение	Примечание
k	см	10	2	
t_k	см	2	0,5	
l	см	5	1	
l_l	см	5	1	
d	см	2	0,8	
j	шт.	22	4	
m	см	5,4	1,0	
d_m	см	50,0	8,0	
μ_t	-	0,9	0,6	

Конструкция №6

Конструкцию 4 можно усовершенствовать другим способом. Обжатие слоёв силового каркаса в конструкции 4 производится перемещением прижимающего фланца вдоль оси рукава. При увеличении диаметра РКП, возрастает число болтов, необходимых для перемещения фланца и создания необходимого усилия обжатия силового каркаса. В конструкции 6 (см. рис. 3.7) силовой каркас обжимается на бортовых кольцах бугельным соединением. Удерживающее усилие T создается прижатием силового каркаса по площади сечения бортовых колец:

$$T = \mu \cdot 2d \cdot \frac{2 m^2 i_m \sigma_{0.2} \pi}{3 \cdot 1.3 \cdot 4}, \quad (3.34)$$

где m – диаметр болтов, стягивающих бугель;

i_m – число болтов;

d – диаметр сечения первого и второго бортовых колец, мм [119].

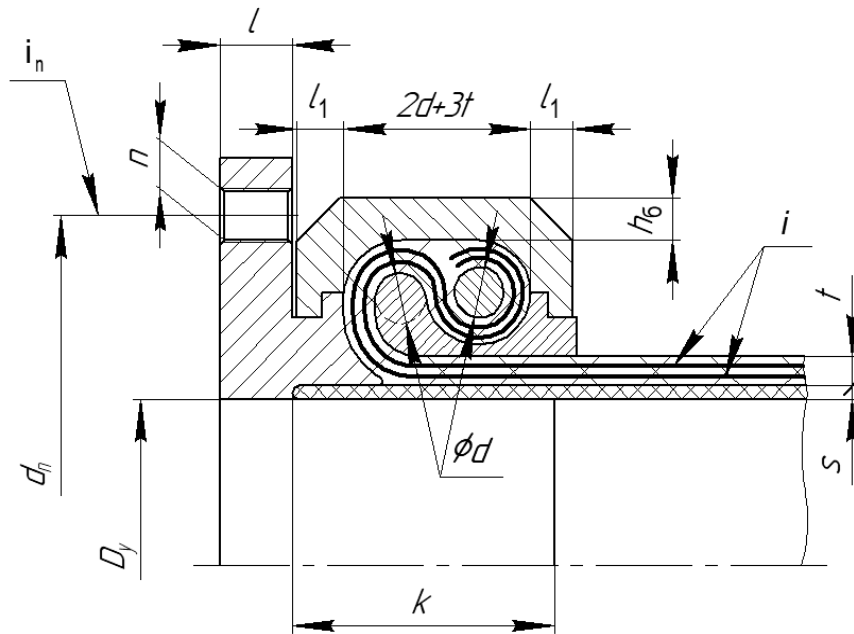


Рис. 3.7. Эскиз конструкции № 6

Число болтов i_m для обеспечения симметричности обжимающего усилия должно быть не менее четырех. Больше четырех его устанавливать также нецелесообразно, поскольку усилие обжатия бортов является сравнительно небольшим. Соответственно, формула (3.34) примет вид:

$$T = \mu \cdot 2d \cdot \frac{2 m^2 \sigma_{0.2} \pi}{3 \cdot 1.3}, \quad (3.35)$$

Расчет диаметра болтов по аналогии с формулой (3.6):

$$m = \sqrt{\frac{1.3T}{\sigma_{0.2}\pi}}. \quad (3.36)$$

Усилие T также определяет минимальную толщину бугеля. Рассчитаем толщину бугеля как толщину металлической трубы длиной $2l_1$ под действием распределенной силы [123]:

$$h_{\text{б}} = \frac{\frac{T}{2\pi l_1 D_{\text{б вн}}} D_{\text{б нар}}}{2J\sigma_{0.2} + \frac{T}{2\pi l_1 D_{\text{б вн}}}}, \quad (3.37)$$

где $D_{\text{б нар}}$ – наружный диаметр рабочей поверхности бугеля;

$D_{\text{б вн}}$ – внутренний диаметр рабочей поверхности бугеля.

Поскольку внутренний диаметр рабочей поверхности бугеля зависит от геометрических размеров борта, а наружный диаметр – от внутреннего диаметра и толщины бугеля $h_{\text{б}}$, преобразуем выражение (3.37):

$$h_{\text{б}} = \frac{\left(\frac{T}{2\pi l_1 D_{\text{б вн}}}\right)(D_{\text{б вн}} + h_{\text{б}})}{2J\sigma_{0.2} + \frac{T}{2\pi l_1 D_{\text{б вн}}}}, \quad (3.38)$$

Раскроем вторые скобки в числителе и умножим всё выражение на знаменатель:

$$2J\sigma_{0.2}h_{\text{б}} + \frac{T}{2\pi l_1 D_{\text{б вн}}}h_{\text{б}} = \frac{T}{2\pi l_1 D_{\text{б вн}}}D_{\text{б вн}} + \frac{T}{2\pi l_1 D_{\text{б вн}}}h_{\text{б}}. \quad (3.39)$$

Сократим одинаковые выражения в правой части, из оставшейся части выразим толщину бугеля:

$$h_{\text{б}} = \frac{T}{4\pi l_1 J\sigma_{0.2}}. \quad (3.40)$$

Ширина буртиков бугеля l_2 определяется действием усилия среза (в данном случае - F_d). В соответствии с известной формулой сопротивления материалов [123], напряжение среза:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F_d}{S}, \quad (3.41)$$

где S – площадь сечения буртика.

Площадь сечения можно найти из геометрии конструкции, умножив ширину буртика на диаметр его окружности:

$$S = l_2 \pi (D_y + 2s + t + d). \quad (3.42)$$

Из формул (3.40), (3.41) следует, что, с учетом коэффициента запаса J , ширина буртика должна быть равна:

$$l_1 = \frac{F_d}{J \tau_{cp} \pi (D_y + 2s + t + d)}. \quad (3.43)$$

Отметим, что ранее был введен параметр толщины выступа крепления гермослоя t_k . На рис. 3.7 выступ отсутствует, и ширина крепления откладывается во «внутреннюю» сторону фланца по его внутренней поверхности. Параметр t_k , соответственно, при этом равен нулю.

Ограничения параметров приведены в таблице ниже.

Длина h свободной части РКП:

$$h = L - 2(l + 2l_1 + 2d). \quad (3.44)$$

Таблица 3.9. Ограничения параметров, специфические для конструкции № 6

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение	Примечание
k	см	10,0	2,0	
l	см	5,0	1,0	
l_1	см	3,0	0,5	
d	см	2,0	0,8	
h_0	см	4,0	0,5	
f	см	3,0	1,5	
μ_t	-	0,9	0,6	

3.3 Математическая модель патрубка на технологическом уровне

На технологическом уровне состав набора параметров не зависит от конструкции РКП. Все подобные резинотехнические изделия при изготовлении проходят несколько стадий:

- заготовка материалов;
- сборка на дорне;
- вулканизация.

Соответствующие этим стадиям параметры РКП:

- марка резины герметизирующего слоя;
- марка резины покровного слоя;
- марка армирующего материала;
- диаметр дорна.

Дорн является лишь частью большого комплекта технологических приспособлений (оснастки) для изготовления РКП. Наиболее дорогой и габаритной оснасткой является пресс-форма для вулканизации РКП. Однако габариты и сложность изготовления пресс-формы не зависят от конструкции РКП. Дорн же является наиболее габаритным элементом оснастки после пресс-формы. Он служит для предварительного формования РКП, то есть определяет его окончательные размеры. Прочая оснастка, служащая для формирования бортов, наложения слоёв корда и т.д. имеет относительно малую стоимость, поэтому далее не рассматривается.

В технологии РТИ под заготовкой понимается выпуск листов материала и их раскрой под определенный размер с целью облегчения их последующего наложения на оснастку (дорн).

Толщина резиновых листов для формирования герметизирующего слоя определяется его толщиной в изделии, рассчитываемой по формуле (3.8).

Толщина листов резины покровного слоя s_r определяется аналогичным образом:

$$s_r = 0.2S_T, \quad (3.45)$$

где S_T - требуемый срок службы РКП в годах.

Марки резин выбираются исходя из конъюнктуры рынка и дополнительных условий, прямо указанных в техническом задании (устойчивость к воздействию масел, морской воды и пр.). Прочность резины не влияет на прочность РКП, поскольку силовым элементом композита является кордный силовой каркас. Таким образом, из параметров, перечисленных выше, марка резины определяет прочность связи резины с различными материалами и коэффициент трения по металлу:

$$M_r = \{S_s, \mu_t\}. \quad (3.46)$$

Допущение б: в принятой постановке модели предполагается, что все резины совместимы друг с другом (справедливо для большинства марок резин, применяемых в РТИ). Аналогично, фактическая прочность связи S_k принята одинаковой для всех сочетаний резин и армирующих материалов.

Марка армирующего материала зависит от доступности материалов и определяет разрывную прочность, плотность корда и толщину полотна t_k :

$$M_k = \{N_{\text{разр}}, i_k, N_n, t_s\}. \quad (3.47)$$

Такие параметры корда как циклическая прочность в расчетах не учитываются. Удлинение и усадка приняты одинаковыми для всех кордов.

Диаметр дорна D_d определяется условным диаметром РКП D_y с учетом усадки резинокордного композита [130]:

$$D_d = D_y \frac{100}{q_k R_k + q_r R_r}. \quad (3.48)$$

где q_r , q_k – экспериментально определяемые коэффициенты усадки резины и корда;

R_r , R_k – процентные доли резины и корда в сечении стенки композитного материала.

С целью сокращения числа переменных, можно в формуле (3.48) выразить одну процентную долю через другую:

$$D_d = D_y \frac{100}{q_k R_k + q_r (100 - R_k)}. \quad (3.49)$$

Процентное содержание корда в стенке РКП определяется отношением толщины слоёв корда t_s , с учетом процентного содержания резины R_{r2} , к толщине четырехмиллиметрового технологического слоя (3.15) [131]:

$$R_k = 100 \times \frac{i t_s R_{r2}}{(i t_s R_{r2} + 0,4)}, \quad (3.50)$$

где R_{r2} - доля корда в обрешеченном полотне.

Из диаметра дорна при необходимости легко может быть найдена ширина листовых заготовок H_0 для изготовления РКП:

$$H_0 = \pi D_d. \quad (3.51)$$

Длина заготовок L_0 относительно длины РКП определяется не усадкой материала, а большими технологическими припусками q_L (необходимость в заворотах, подрезках кромок и т.д.):

$$L_0 = L \times q_L. \quad (3.52)$$

Ограничения выбранных параметров приведены в таблице ниже.

Таблица 3.10. Ограничения параметров технологического уровня

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение
s_r	см	1,5	0,3
t_s	мм	4	0,3
D_d	см	25,0	4,5
q_r	%	15	0

Продолжение таблицы 3.10

Параметр	Единица измерения	Максимальное допустимое значение	Минимальное допустимое значение
q_k	%	15	0
R_{r2}	%	20	5
H_0	см	79	14,5
L_0	см	1300	44
q_L	-	1,3	1,1

3.4 Объединение полученных математических моделей

Предполагается, что в процессе оптимизации РКП автоматический решатель может генерировать любую из рассмотренных конструкций. Для обеспечения возможности перехода между различными конструктивными решениями, все параметры объединены в математическую модель, представляющую собой пространство параметров, объединенных выявленными зависимостями. Таким образом, переход между различными конструктивными решениями будет состоять в занулении части параметров, и в готовом решении часть параметров конструктивного уровня также будет равняться нулю. Примеры таких решений и соответствующих конструкций приведены после таблицы параметров, на рисунках 3.8, 3.9.

В таблице 3.11 приведены параметры, а также определяющие их зависимости. Для упрощения работы с программой, данные зависимости необходимо проанализировать, и определить, какие параметры должны вводиться пользователем, а какие – рассчитываться, либо считываться из источников данных (информационного обеспечения программы).

Таблица 3.11. Сводная таблица параметров модели

№	Обозначение	Параметр	Зависимость	№	Обозначение	Параметр	Зависимость
1	P	давление рабочей среды	ТЗ	26	k_c	коэффициент для вычисл. стоимости	БД
2	μ	запас прочности	ТЗ	27	k_m	коэффициент для вычисл. массы	БД
3	D_y	условный внутренний диаметр	ТЗ, из ряда по ГОСТ	28	l	толщина фланца	ГОСТ
4	L	длина РКП	ТЗ	29	l_l	толщина буртика	(3.43)
5	ψ	надежность	ТЗ	30	t	толщ. стенки	(3.15)
6	S_T	гарантийный срок	ТЗ	31	t_k	толщина втулки	(3.19)
7	p_1	тип раб. среды	ТЗ	32	t_s	толщина слоя корда	БД
8	p_2	работа на вакуум	ТЗ	33	s	толщина ГС	(3.8)
9	S_M	макс. разрешенная масса	ТЗ	34	S_k	прочн. связи резина-корд	БД
10	S_C	макс. стоимость	ТЗ	35	S_s	прочн. связи резина-резина	БД
11	d	диаметр закладного элемента	(3.22), (3.30)	36	β	угол нитей в РКП	const
12	dn	диаметр расположения нар. болтов	по ГОСТ	37	$\sigma_{0.2}$	предел прочности металла РКП	БД
13	dm	диаметр расположения внутр. болтов	(3.31)	38	τ_{cp}	прочность металла на срез	БД
14	m	диаметр болтов крепления	(3.25)	39	μt	коэфф. трения резина-металл	БД
15	n	ном. диаметр болтов	по ГОСТ	40	sr	толщина листов резины	(3.45)
16	$N_{разр}$	разрывная прочность нитей	БД	41	Dd	диаметр дорна	(3.49)

Продолжение таблицы 3.11.

№	Обозначение	Параметр	Зависимость	№	Обозначение	Параметр	Зависимость
17	N_n	число нитей на см.	(3.14)	42	q_r	коэффициент усадки резины	<i>const</i>
18	h	длина свободной части РКП	(3.18), (3.32), (3.44)	43	q_k	коэффициент усадки корда	<i>const</i>
19	h_6	толщина бугеля	(3.40)	44	R_k	доля корда в композите РКП	(3.50)
20	i	число слоев	(3.13)	45	R_{r2}	доля корда в обрешиненном полотне	БД
21	i_k	плотность нитей корда	БД	46	H_0	ширина листов	(3.51)
22	i_n	число прис. болтов РКП	ГОСТ	47	L_0	длина заготовок	(3.52)
23	j	число штифтов	(3.21)	48	q_L	технологические припуски	<i>const</i>
24	J	коэфф-т запаса прочн.	<i>const</i>	49	M_r	марка резины	БД
25	k	ширина области привулканизации ГС	(3.16)	50	M_k	марка корда	БД

P	20	m	0	k_m	1,2	s_r	2
μ	1,2	n	1,8	l	2,2	D_d	16,87
D_y	15	$N_{разр}$	50	l_1	0	q_r	0,85
L	100	N_n	8,3	t	0,8	q_k	0,96
ψ	96	h	81,6	t_k	1,2	R_k	18,3
S_T	10	h_6	0	t_s	2,2	R_{r2}	0,9
p_1	1	i	1	s	2	H_0	53
p_2	0	i_k	8,3	S_k	45	L_0	110
S_M	200	i_n	12	S_s	60	q_L	1,1
S_C	50 000	j	12	β	54,4	M_r	ПП-1
d	0,6	J	1,5	$\sigma_{0,2}$	600	M_k	ККО-2,0
d_n	20	k	7	τ_{cp}	300		
d_m	0	k_c	1,6	μ_t	0,7		

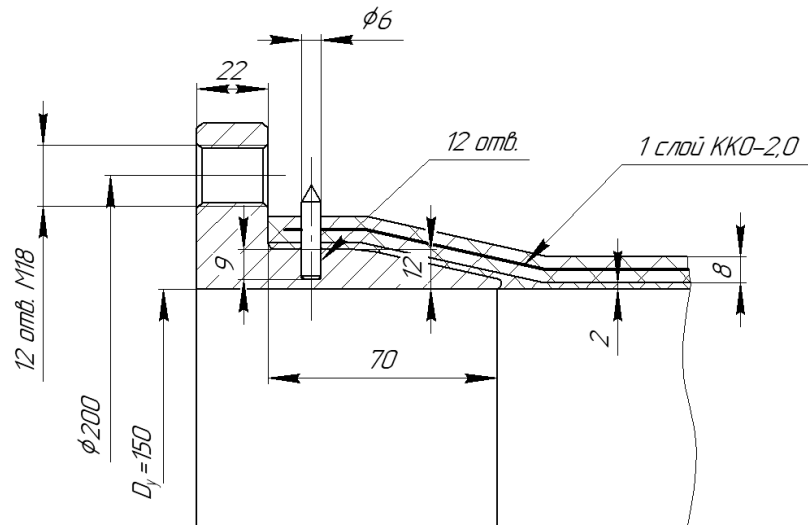


Рис. 3.8. Пример РКП конструкции 3 и соответствующего набора параметров

P	50	m	1,1	k_m	1,3	s_r	3
μ	1,2	n	1,2	l	24	D_d	16,2
D_y	15	$N_{разр}$	35	l_1	24	q_r	0,85
L	150	N_n	6	t	8	q_k	0,96
ψ	98	h	140,4	t_k	0,8	R_k	26,2
S_T	15	h_6	0	t_s	1,1	R_{r2}	0,85
p_1	1	i	3	s	3	H_0	53
p_2	0	i_k	6,1	S_k	45	L_0	1650
S_M	350	i_n	18	S_s	60	q_L	1,1
S_C	90 000	j	0	β	54,4	M_r	ПИ-1
d	1,6	J	1,5	$\sigma_{0,2}$	600	M_k	ККО-1,0
d_n	25	k	50	τ_{cp}	300		
d_m	29	k_c	1,8	μ_t	0,7		

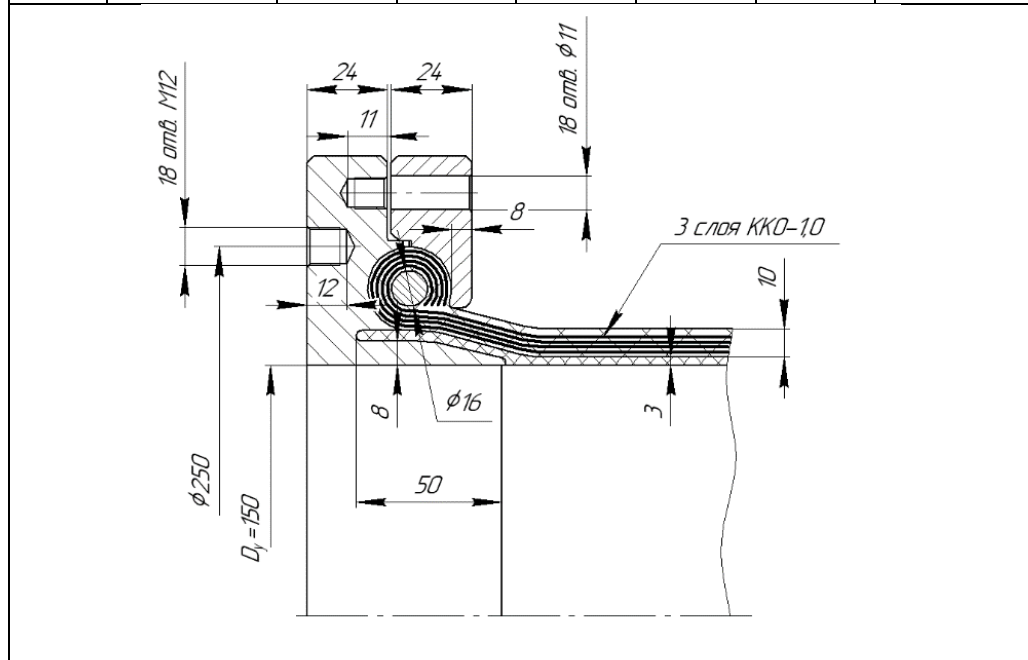


Рис. 3.9. Пример РКП конструкции 4 и соответствующего набора параметров

Алгоритм расчета параметров модели решателем будет состоять из последовательных шагов [132].

Шаг 1. Считывание данных ТЗ;

Шаг 2. Поиск в БД параметров 12, 15, 22, считывание из БД параметров 24, 26, 27, 28, 36;

Шаг 3. Расчет промежуточного параметра F_d (3.5);

Шаг 4. Расчет параметров 23, 33, 40, 46, 47.

Шаг 5. Выбор корда и металла: определяет параметры 16, 21, 32, 34, 35, 37, 38, 39, 42, 43, 45, 49, 50.

Шаг 6. Расчет параметров 18, 19, 29, 30, 44.

Шаг 7. Расчет параметра 41.

Итеративный процесс разработки конструкции будет заключаться в повторении шагов 5-7 с оценкой промежуточных результатов.

При заданных рабочих характеристиках и уровне надёжности, в качестве целевой функции можно записать функцию материалоёмкости РКП как параметра, связанного с ценой конечного изделия. Фактическая стоимость РКП существенно зависит от количества используемого в конструкции металла (сумма параметров l , l_1 и d) и цены используемого корда. Соотношение этих двух составляющих цены зависит от длины РКП (с увеличением длины РКП возрастает доля армирующего материала в его цене). Соответствующий поправочный коэффициент уравнивает стоимость металлоарматуры и силового каркаса в РКП длиной 50 см. По аналогии с параметром максимальной стоимости РКП S_C , обозначим минимизируемый параметр как $S_C \min$. Поскольку цена корда прямо зависит от его прочности, целевая функция будет иметь следующий вид:

$$S_C \min = 2(l + l_1 + d) + i \cdot N_{\text{разр}} \frac{L}{50}. \quad (3.53)$$

Выводы по главе 3

В рамках выполнения задач диссертации получено математическое описание шести типовых конструкций РКП на различных уровнях проектирования. На системном уровне РКП представлен как набор независимых параметров, всего 10 параметров; на конструктивном уровне выделены общие параметры и параметры, зависящие от типа конструкции, всего 31 параметр; на технологическом уровне выделено 9 параметров. Материальный уровень представлен в модели в виде базы материалов и отнесен к информационному обеспечению САПР, рассматриваемому в главе 5.

Полученные в главе зависимости, таблицы ограничений и целевая функция могут быть использованы в качестве математического обеспечения САПР РКП. Сформулированные в главе допущения определяют область применения полученных решений.

Глава 4. Модификация и тестирование генетического алгоритма оптимизации

Предложенная в главе 2 методика проектирования предполагает, что программа-ядро по запросу пользователя считывает модель конструкции на системном уровне и последовательно осуществляет оптимизацию конструкции на конструктивном, технологическом и материальном уровнях. Для этого программа считывает функциональные зависимости между оптимизируемыми параметрами и таблицы накладываемых на эти параметры ограничений. Оптимизация, в соответствии с методикой, производится генетическим алгоритмом. Поскольку операции диалога и ввода-вывода данных являются служебными, основной частью ядра является именно генетический алгоритм.

В соответствии с задачей работы, необходимо исследовать, насколько успешно генетический алгоритм справляется с минимизацией материалоёмкости изделий типоряда.

4.1 Модификация генетического алгоритма дифференциальной эволюции

В главе 2 в качестве базового алгоритма было предложено использовать алгоритм дифференциальной эволюции. Алгоритм приведен на рисунке 4.1.

Рассмотрим визуальное представление положения «генотипов» на поверхности, образуемой целевой функцией. Последовательность процесса оптимизации показана на рисунке 4.2.

Из рисунка видно, что по мере приближения к точке минимума все генотипы также собираются в расположенном вокруг неё «овраге» [133, 134]. Этим обусловлен основной недостаток генетических алгоритмов – попав в точку локального минимума, алгоритм за счет сокращения «генетического разнообразия» может утратить возможность покинуть локальный минимум [135].

Отметим, что решение поставленной в работе задачи сводится к аналогичной проблеме – изменение исходных данных для проектирования вызывает смещение глобального минимума. При этом если обновления популяции не произошло, она остаётся в области локального минимума и не может из него выйти: хотя почти все параметры уже оптимизированы, разнообразия популяции недостаточно для создания новых генотипов.

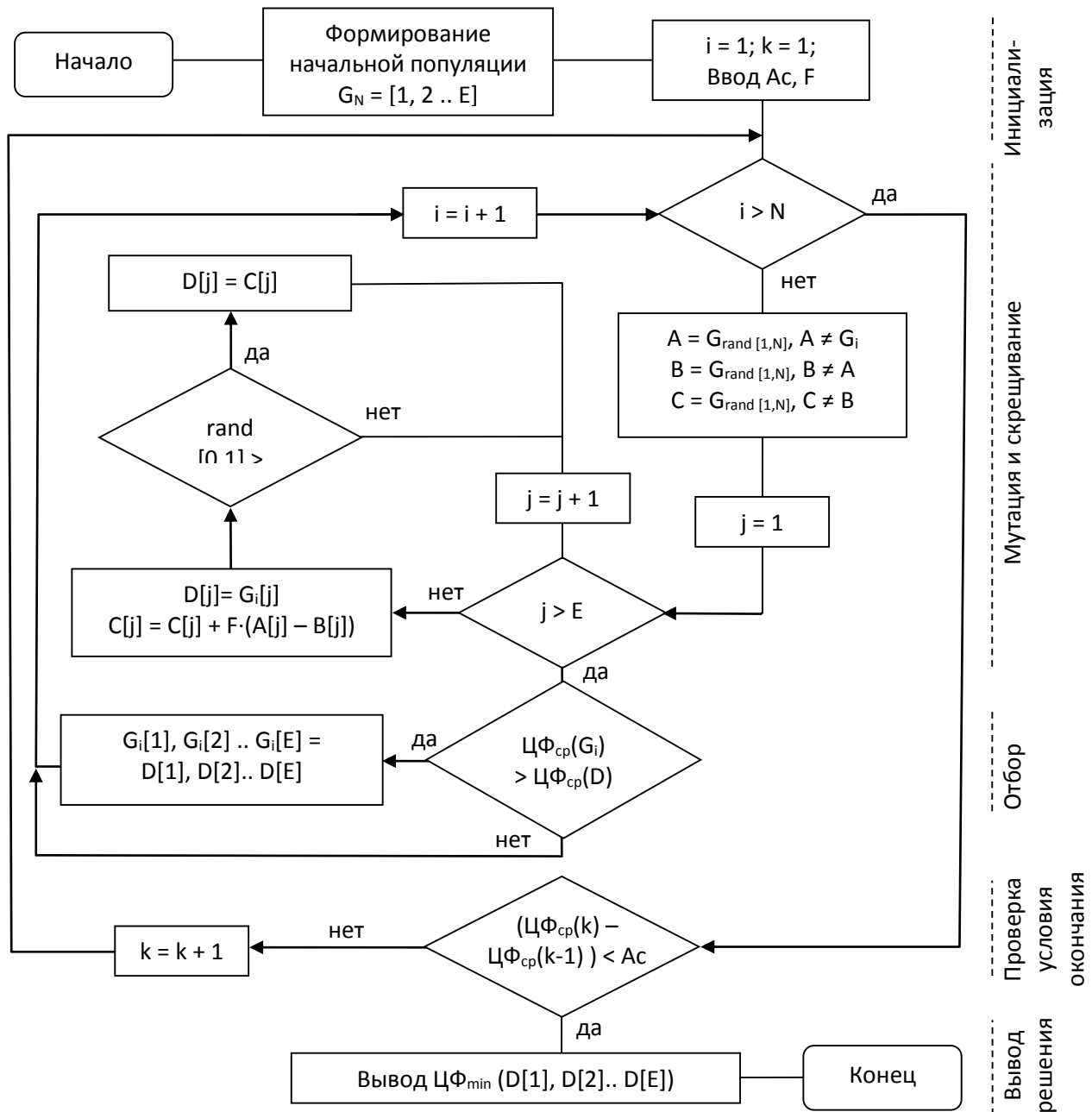


Рис. 4.1. Алгоритм дифференциальной эволюции

Рассмотренный недостаток хорошо известен и подробно исследовался в ряде работ [136-138]. Анализ литературы выявляет два возможных решения: более точная настройка параметров алгоритма и коэффициентов мутации [139]. В последнем случае коэффициент может иметь сравнительно большой вес, что, в случае умножения на один из параметров генотипа, позволяет генотипу выйти из области локального минимума.

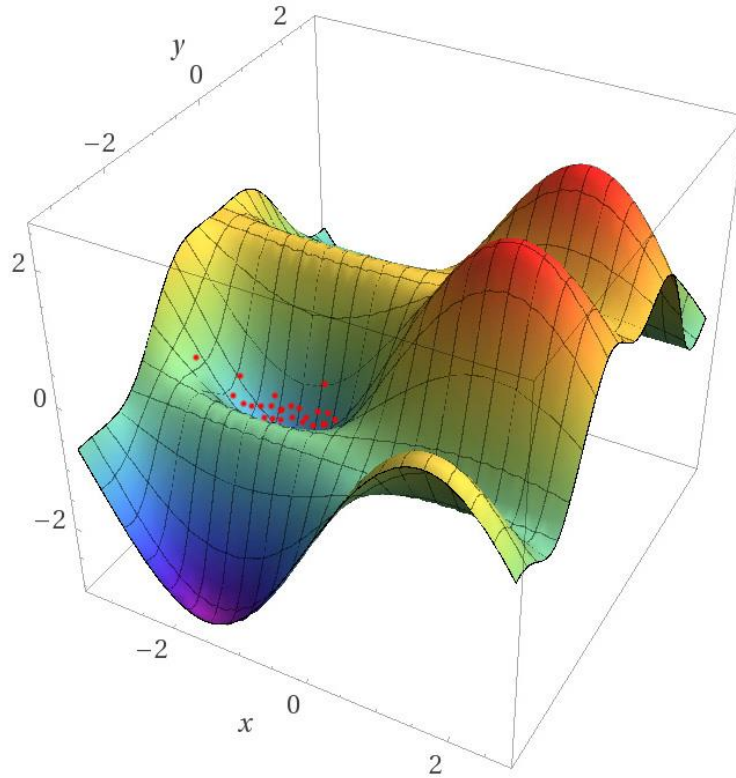


Рис. 4.2. Визуальное представление процесса оптимизации генетическим алгоритмом. Точками обозначены экземпляры генотипов

В ряде публикаций [140-142] эффективность алгоритма предлагается повысить путём «динамического» изменения его основных параметров. Рассмотрим другой вариант решения описанной проблемы. Одним из существенных отличий «природных» ДНК-генотипов является наличие рецессивных и доминантных генов. Рецессивные гены проявляются в генотипе только при определенных условиях, однако их проявление может существенно изменить свойства организма [143, 144]. Проверка данного предположения требует модификации исходного алгоритма.

Исходный алгоритм дифференциальной эволюции представлен на рисунке 4.1. Для разработки модифицированного алгоритма предложено внести следующие изменения:

- рецессивные гены добавлены в общий список генов после доминантных. Таким образом, объем генотипа увеличивается в два раза;
- мутации происходят по всему генотипу одинаково;
- при расчете коэффициентов целевой функции вначале происходит расчет «фенотипа»: части генотипа, которая будет проявлена в решении. Данный расчет включает в себя выбор другого организма, сравнение его набора рецессивных генов с имеющимся и выявление близких совпадений между наборами рецессивных генов. При наличии близкого совпадения, ген проявляет себя в «фенотипе» взамен гена, находящегося на данной позиции в «доминантной» части генотипа. При этом он также с некоторой вероятностью переходит на позицию доминантного. Данные изменения отражены в модифицированном алгоритме, приведенном на рисунке 4.3.

Проанализируем работу рецессивных генов в предложенном алгоритме. По мере приближения популяции к точке минимума, доминантные гены должны успешно обеспечивать процесс минимизации. Поскольку проявление рецессивных генов требует дополнительных условий, вероятность их проявления невелика, в результате чего в них накапливаются мутации и набор рецессивных генов постепенно расходится с набором доминантных. В момент изменения одного из параметров целевой функции (оптимизации новой конструкции типоряда), доминантные гены на данной позиции генотипа перестают обеспечивать удовлетворительное решение. Возрастает вероятность того, что наилучшим решением будет решение, получаемое при проявлении рецессивного гена, поскольку к указанному моменту данный набор генов гораздо более разнообразен по сравнению с доминантными генами, стремившимися к прежней точке минимума.

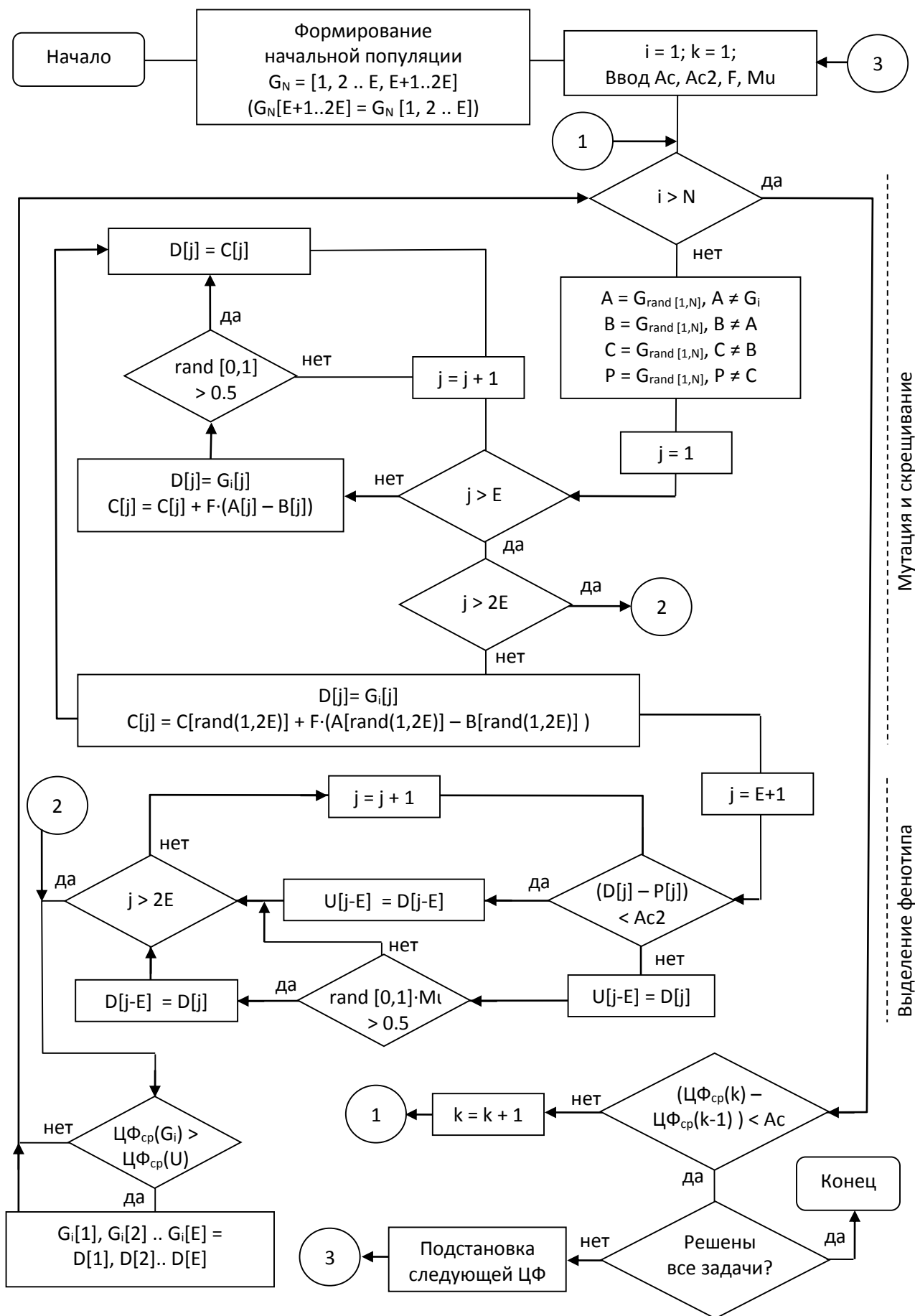


Рис. 4.3. Модифицированный алгоритм

Для проверки эффективности модифицированного алгоритма, а также выдвинутых предположений, каждый алгоритм реализован в виде программы. Эксперименты с программами описаны в следующих разделах данной главы.

4.2 Подготовка данных для тестирования алгоритма

Рассматриваемая задача оптимизации должна быть многоэкстремальной и содержать достаточно большое число переменных, подобно реальной задаче оптимизации изделия. В качестве исходных данных для тестирования алгоритмов взяты многоэкстремальные функции, построенные по методу Фельбаума [145, 146]. Данный метод позволяет получить функцию с достаточно сложным рельефом, при этом он прост в реализации и нагляден. В соответствии с данным методом, функция строится на основе простых степенных одноэкстремальных функций вида:

$$I_i(x - c_i) = \sum_{j=1}^n a_{ij} |x_j - c_{ij}|^{p_{ij}} + b_i, p_{ij} > 0. \quad (4.1)$$

Полученная функция будет иметь минимум в точке c_i , а значение в этой точке будет равно b_i . Если $p_{ij} > 0$ (степень гладкости функции в районе экстремума), то в точке минимума функция будет гладкой, а если $0 < p_{ij} \leq 1$, то в точке минимума функция будет угловой (не дифференцируемой).

Коэффициент a отвечает за степень крутости функции в районе экстремума. Чтобы построить многоэкстремальную функцию необходимо применить оператор минимума к набору одноэкстремальных функций. Общий вид будет следующим:

$$I(x) = \min\{\sum_{j=1}^m a_{ij} |x_j - c_{ij}|^{p_{ij}} + b_i, i = \overline{1, N}\}. \quad (4.2)$$

Поскольку в математической модели РКП содержится достаточно большое число переменных, число корней тестовых функций было выбрано равным шести. Пример функции из трёх уравнений:

$$\begin{cases} I_1(x - c_1) = 2|x_1|^{1.5} + 5|x_2|^{2.5} + 3|x_3 - 2|^2 + 1|x_4 - 2|^3 + 4|x_5|^{1.8} + 3|x_6 - 3|^{2.8} + 8; \\ I_2(x - c_2) = 3|x_1 - 2|^{2.3} + 1|x_2 - 2|^{1.8} + 3|x_3 - 1|^{2.9} + 2|x_4|^{1.9} + 1|x_5|^{1.2} + 2|x_6 - 2|^{3.1} + 10; \\ I_3(x - c_3) = 1|x_1 - 3|^{3.5} + 1|x_2|^{2.2} + 2|x_3 - 2|^{3.1} + 4|x_4 - 1|^{2.2} + 3|x_5 - 3|^3 + 2|x_6 - 1|^{1.1} + 3; \\ I(x) = \min\{I_1, I_2, I_3\}. \end{cases} \quad (4.3)$$

Глобальным является минимум функции в точке, соответствующей минимуму функции I_3 : (3, 0, 2, 1, 3, 1).

В процессе тестирования каждая оценка эффективности ГА проводилась путём вычисления среднего значения ЦФ после 500 тестов. Успешным считалось решение, имеющее точность (несовпадение с истинными корнями уравнений) в десять процентов или менее [147]. Итерации останавливались при различии среднего решения по двум итерациям менее 0.01. Эти цифры были выбраны как компромисс между большим числом одиночных тестов и машинным временем тестирования. Все результаты тестирования, представленные в табличной форме, для наглядности представлены в виде графиков, приведенных в приложении А.

Вначале исследовано, какое влияние на эффективность алгоритма оказывают «внешние» параметры: разброс локальных минимумов целевой функции (иначе говоря, её неоднородность) и разброс начальных значений популяции относительно корней глобального минимума функции. Результаты тестирования представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Влияние параметров целевой функции на решение задачи

№	Изменяемый параметр	Значение параметра	Процент успешных решений
1.1	Разброс локальных минимумов, %	65	51
1.2		50	54
1.3		35	50
1.4		15	55
2.1	Коэффициент разброса начальных значений «популяции»	20	22
2.2		15	27
2.3		10	37
2.4		5	52

Величина разброса локальных минимумов m определялась относительно среднего минимума всех функций, составляющих ЦФ:

$$Q_1 = \frac{\sum_n \left| \frac{\sum_n m}{n} - m \right|}{\sum_n m} \times 100, \quad (4.4)$$

где n – число функций, составляющих целевую функцию.

Коэффициент разброса начальных значений Q_2 рассчитывался относительно корней глобального минимума:

$$Q_2 = \frac{K_{max}}{T_{min}}, \quad (4.5)$$

где K_{max} – максимальное значение корней в начальной популяции;

T_{min} – минимальное значение корня в глобальном минимуме.

Таким образом, различия в числе локальных минимумов выбранной тестовой функции мало влияют на сходимость решения, что относится к известным достоинствам алгоритма [148]. В то же время, значительный разброс начальных значений может более чем вдвое снизить эффективность алгоритма.

Специфическим для итерационных алгоритмов, к которым относятся и генетические алгоритмы, является показатель зависимости скорости сходимости решения от численного значения критерия остановки. В реализованном алгоритме использован классический критерий - различие среднего решения по двум последовательным итерациям. Результаты тестирования по данному параметру представлены в таблице 4.2. Среднее число итераций для получения успешного решения рассчитывалось по всем успешным решениям, полученным для выбранного сочетания параметров ГА.

В результате данного теста определено, что процент полученных удовлетворительных решений падает при снижении требований к сходимости процесса оптимизации.

Таблица 4.2 Результаты тестирования по требуемой точности τ

№	Тест	Значение параметра τ	Процент успешных решений	Среднее число циклов (итераций) для получения успешного решения
1.1	Различие среднего решения по двум итерациям	0,01	98	27,5
1.2		0,05	95	21,7
1.3		0,1	92	19,5
1.4		0,15	89	17,7
1.5		0,3	70	17,0
1.6		0,45	46	15,5

Отдельно исследована зависимость скорости сходимости решения от вероятности мутации и коэффициента мутации F (см. главу 2). Данные показатели являются во многом специфичными для выбранного алгоритма оптимизации. Результаты тестирования представлены в таблице 4.3. Данные таблицы показывают, что процент успешных решений может быть доведен до 99 процентов и более подбором оптимальной вероятности мутации, либо параметра F .

Для тестовой задачи 1 (4.3) близки к оптимальным следующие значения требуемой точности, коэффициента и процента мутаций: 0.01, 0.3, 50%.

Однако при выборе указанных оптимальных параметров ГА, влияние других параметров становится слишком малым. Для определения степени их влияния на процесс оптимизации, вероятность мутации во всех тестах снижена до 25 процентов.

Дополнительно исследован такой параметр ГА как число особей в одной популяции. Результаты тестирования представлены в таблице 4.4. При большом числе особей возможно небольшое возрастание точности получаемого решения, однако связанные с этим временные затраты слишком велики – возрастание точности на пять процентов потребовало в четыре с лишним раза больше вычислительного времени.

Таблица 4.3 Результаты тестирования по специфическим параметрам ГА

№	Изменяемый параметр		Процент успешных решений	Среднее число циклов (итераций) для получения успешного решения
	Вероятность мутации, %	Параметр F		
1.1	95	0.3	77	28
1.2	75		>95	31
1.3	50		>95	40
1.4	25		>95	54
1.5	10		81	82
2.1	25	0.6	>90	75
2.2		0.4	>95	55
2.3		0.1	>95	45
2.4		0.05	74	44

Таблица 4.4 Результаты тестирования по величине популяции

№	Число особей в популяции	Процент успешных решений	Среднее число циклов (итераций) для получения успешного решения	Время вычисления решения, ms
1.1	10	63	48	1.39
1.2	20	>95	54	3.03
1.3	30	>95	57	4.68
1.4	50	>95	58	8.01
1.5	100	>99	60	16.73

4.3 Тестирование модифицированного генетического алгоритма дифференциальной эволюции

После модификации алгоритма по предложенному методу, сравнение на произвольном наборе настроек ГА показывает падение точности и скорости сходимости по сравнению с оригинальным алгоритмом. Это можно объяснить «зашумлением» генотипа рецессивными генами, периодически проявляющимися в процессе поиска. О снижении скорости сходимости при конкретных значениях параметров ГА можно судить по данным таблицы 4.5 в сравнении с таблицей 4.2, таблицы 4.6 в сравнении с таблицей 4.3. Хотя алгоритм модифицирован с целью более эффективного решения ряда последовательных задач, вначале необходимо протестировать его в режиме решения одной задачи за один запуск программы [149].

В первом тесте исследована зависимость скорости сходимости и точности решения от требуемой точности совпадения итераций (жесткости критерия остановки алгоритма). Можно предположить, что в условиях большего генетического разнообразия (большого охвата пространства решений) ослабление критерия остановки приведет к нахождению большего числа локальных минимумов

Таблица 4.5 Результаты тестирования по требуемой точности τ

№	Тест	Значение параметра τ	Процент успешных решений	Среднее число циклов (итераций) для получения успешного решения
1.1	Жесткость критерия остановки	0,001	81	71
1.2		0,005	68	68
1.3		0,01	61	66
1.4		0,05	28	51
1.5		0,1	15	40
1.6		0,15	9	31
1.7		0,3	4	27

Анализ полученных результатов показывает, что высказанное предположение подтвердилось. Модифицированный алгоритм требует задания более жесткого критерия остановки.

Таблица 4.6 Результаты тестирования по специфическим параметрам ГА

№	Изменяемый параметр		Процент успешных решений	Среднее число циклов (итераций) для получения успешного решения
	Вероятность мутации, %	Параметр F		
1.1	95	0.4	>95	60
1.2	75		>95	64
1.3	50		>95	77
1.4	35		94	83
1.5	25		75	70
1.6	10		13	107
2.1	25	0.6	77	104
2.2		0.4	75	70
2.3		0.2	74	64
2.4		0.15	70	56

Из результатов экспериментов, представленных в таблице 4.6, можно отметить увеличение среднего числа циклов (в которых получены успешные решения) с приближением коэффициента мутации к минимальным значениям. Это обусловлено тем, что значительное снижение числа мутаций снижает генетическое разнообразие популяции, что и сказывается на скорости решения задачи.

Параметр F меньше влияет на процесс оптимизации в модифицированном алгоритме и может быть использован для дополнительной подстройки точности. По данным таблиц 4.5 и 4.6 можно сказать, что для модифицированного алгоритма поиск оптимальных параметров ЦФ для получения удовлетворительной точности также не является сложной задачей.

Перейдём к рассмотрению задачи, для оптимизации которой разрабатывался модифицированный алгоритм.

Вопрос оценки неоднородности целевой функции и её влияния на точность решения кратко затронут при тестировании, результаты которого представлены в таблице 4.1. По аналогии с формулой (4.4) составим формулу для сравнения двух функций с одинаковым числом локальных минимумов n :

$$Q_3 = \left(\frac{\sum_n |m_1 - m_2|}{n} / \frac{\sum_n m_1}{n} \right) \times 100 = \frac{\sum_n |m_1 - m_2|}{\sum_n m_1} \times 100, \quad (4.6)$$

где m_1 и m_2 – локальные минимумы первой и второй функции.

Используя полученную формулу можно вычислить оценку «смещения» корней целевой функции, а благодаря оценке – её влияние на скорость «корректировки» полученного ранее решения для достижения новой оптимальной точки.

Результаты тестирования немодифицированного алгоритма (последовательное решение двух задач без обновления генотипа перед второй задачей) по параметру Q_3 представлены в таблице 4.7. Установленные при тестировании значения параметров:

- 1) $\tau = 0,01$;
- 2) $F = 0,4$;
- 3) вероятность мутации: 50%.

Результаты тестирования модифицированного алгоритма по параметру Q_3 представлены в таблице 4.8.

Из данных таблицы 4.8 следует, что модифицированный алгоритм показал примерно вдвое большую эффективность при решении поставленной задачи: при значениях Q_3 от 30 до 120 процент успешных решений в 1,4-2 раза выше аналогичных результатов из таблицы 4.7.

Было бы неверно предположить, что модифицированный алгоритм в целом эффективнее немодифицированного. Несмотря на сравнительно высокую точность результатов, количество необходимых итераций при значениях Q_3 от 100 и выше

сопоставимо с количеством итераций при повторном запуске оригинального алгоритма. Иначе говоря, при больших различиях двух задач эффективнее будет решать их по отдельности оригинальным алгоритмом. Модифицированный же алгоритм эффективнее справляется именно с поставленной специфической задачей – оптимизацией типорядов, т.е. задач, в которых относительное различие целевых функций составляет от 20 до 50 процентов.

Таблица 4.7 Результаты тестирования немодифицированного алгоритма по параметру Q_3

№	Q_3	Задача 1			Задача 2		
		Процент успешных решений	Ср. ошибка решения	Среднее число итераций	Процент успешных решений	Ср. ошибка решения	Среднее число итераций
1.1	0	>95	0,38	42,0	>95	0,18	3,5
1.2	12,5	>95	0,36	42,6	>95	1,34	15,5
1.3	28	>95	0,33	41,9	40	1,8	35,4
1.4	50	>95	0,35	42,5	33	1,68	39,3
1.5	75	>95	0,3	41,2	60	0,49	61,8
1.6	100	>95	0,33	41,8	55	0,36	87
1.7	125	>95	0,39	42,6	46	0,4	90

Еще раз отметим, что тестирование алгоритмов проводилось при неоптимальных настройках. Оптимальные настройки дополнительно повышают точность получаемых решений. Такая настройка позволяет использовать алгоритм для последовательной оптимизации 5-6 задач без падения точности решения, при этом суммарный выигрыш по числу необходимых итераций возрастает с каждой следующей задачей.

Таблица 4.8 Результаты тестирования модифицированного алгоритма по параметру Q_3

№	Q_3	Задача 1			Задача 2		
		Процент успешных решений	Ср. ошибка решения	Среднее число итераций	Процент успешных решений	Ср. ошибка решения	Среднее число итераций
1.1	0	89	1,8	52	97	1,3	6,5
1.2	15	92	1,8	53	87	1,8	24
1.3	30	90	1,8	53	73	1,4	33
1.4	50	92	1,8	53	78	1,3	43,7
1.5	70	89	1,8	52	79	1,2	48
1.6	100	91	1,8	53	85	0,73	64,7
1.7	120	91	1,7	53	81	0,63	63

Выводы по главе 4

С целью решения задачи численной минимизации материалоёмкости изделий типоряда, модифицирован один из алгоритмов генетической оптимизации - алгоритм дифференциальной эволюции. В алгоритм добавлен блок рецессивных «генов». Сделано предположение, что данные гены могут повысить эффективность алгоритма при последовательной оптимизации смежных задач. Для тестирования алгоритмов выбраны функции Фельбаума, поскольку они позволяют сравнительно легко формулировать задачи многокритериальной оптимизации.

Выполненное тестирование алгоритмов подтвердило сделанное предположение и позволило численно оценить положительный вклад рецессивных генов в решение поставленной задачи оптимизации типоряда изделий. Анализ полученных данных показал, что модифицированный алгоритм наиболее эффективен при решении (оптимизации) серий задач, в которых относительное различие целевых функций составляет от 20 до 50 процентов. При использовании математических моделей РКП, полученных в главе 3, это означает, что при проектировании изделий типоряда могут меняться до пяти исходных параметров из имеющихся десяти.

Глава 5. Информационное обеспечение и реализация подсистемы инженерных расчетов типорядов резинокордовых патрубков

Реализация предложенной в главе 2 методики проектирования типорядов РКП на языке высокого уровня совместно с реализацией алгоритма, разработанного в главе 4, может быть интегрирована в систему автоматизированного проектирования РКП, действующую на предприятии. Разработанные математические модели РКП будут являться математическим обеспечением данной подсистемы. В соответствии с принципами проектирования САПР [150], для осуществления работы с системой необходимо также информационное обеспечение. После разработки информационного обеспечения приводится описание программной реализации путем объединения ранее разработанных компонентов.

Поскольку полученная подсистема является сравнительно простой, а современное системное ПО достаточно универсальным, вопросы, относящиеся к системному программному обеспечению САПР РКП, в работе не рассматриваются.

5.1 Информационное обеспечение

Информационное обеспечение разрабатываемой подсистемы разделено на два блока: справочную и техническую информацию.

В блок справочной информации включены:

- теоретическая часть;
- руководство пользователя.

Блок технической информации содержит «служебную» (внутреннюю) информацию САПР и информацию, доступную пользователю для просмотра и редактирования в процессе работы с САПР. Служебной информацией являются:

- промежуточные результаты работы САПР, не сохраняющиеся в постоянной памяти ЭВМ;

- аналитические зависимости, полученные в главе 3 и используемые системой в процессе автоматизированного проектирования. Данные зависимости частично приведены в теоретической части справочного блока ИО.

Доступная пользователю информация: данные таблиц ограничений, рассмотренных в главе 3, а также исходные и справочные данные.

Описанное ИО представлено в подсистеме в виде следующих текстовых файлов:

- руководство пользователя.txt;
- справочник пользователя.txt;
- таблицы ограничений.txt;
- исходные данные.txt;
- справочные данные.txt;
- служебный файл.txt;
- выходной файл.txt.

Такой подход имеет следующие преимущества:

- простота реализации;
- наглядность;
- возможность работы с файлами ИО стандартными средствами ОС без подключения дополнительных библиотек.

Недостатки:

- затруднение работы и синхронизации при увеличении объема используемых данных;
- сложность интеграции с другими системами и информационными ресурсами [151].

Указанные недостатки могут быть устранены написанием подпрограмм-трансляторов, реализующих удобные интерфейсы для ввода пользовательских данных, а также автоматическое преобразование данных в необходимый формат [152].

Соответствующие примеры содержания файлов показаны на рисунках 5.1-5.7.

Файл «руководство пользователя» содержит общие сведения о программе, а также подробное описание последовательности работы с ней.

Файл «справочник пользователя» содержит техническую информацию, необходимую для работы с программой: формат заполнения пользовательских файлов, формат вывода, единицы измерения величин, описание возможных ошибок, глоссарий.

Файл «таблицы ограничений» содержит ограничения параметров, определенные в главе 3. Для каждого из параметров приводится верхняя, а затем нижняя граница.

Файл «исходные данные» используется для ввода пользователем данных технического задания. Для упрощения интерфейса, тип рабочей среды и работа на вакуум задаются индексами из списков: {1 вода, 2 воздух, 3 морская вода, 4 нефть}, {0 нет, 1 да}.

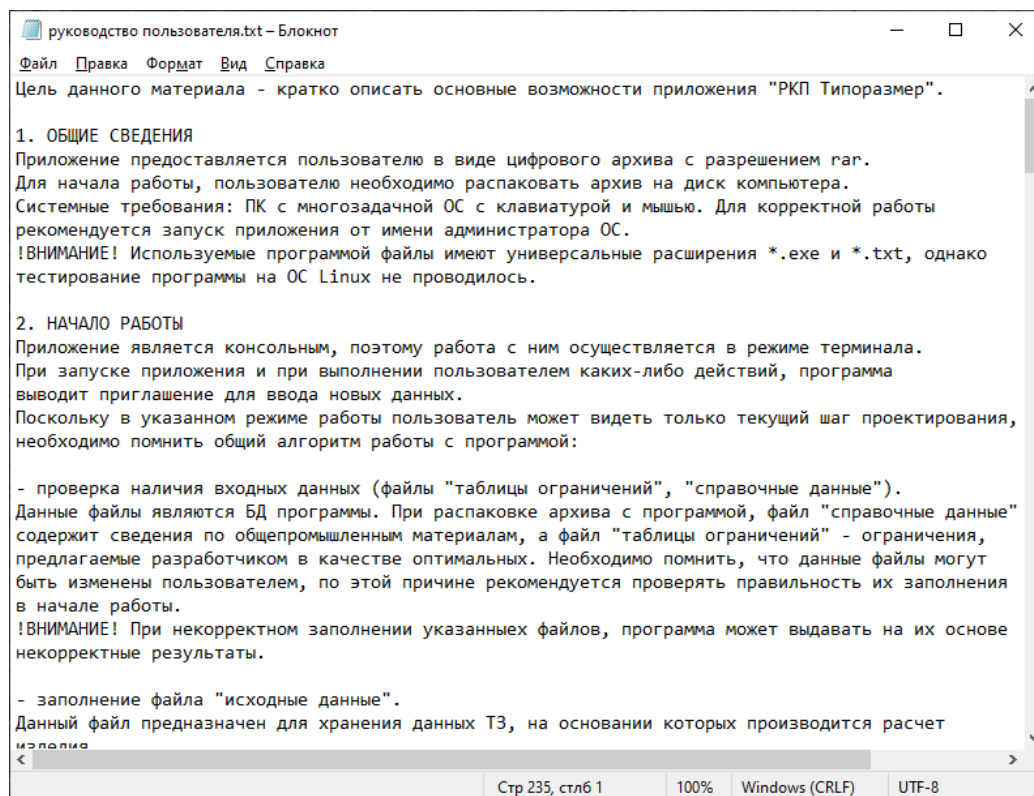


Рис. 5.1. Содержание файла «руководство пользователя»

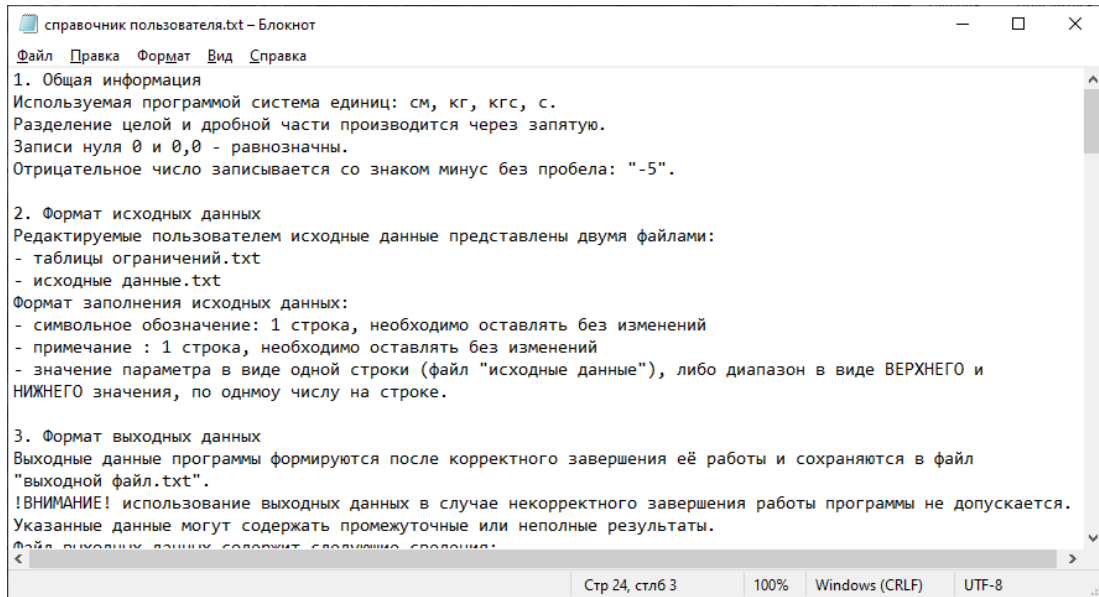


Рис. 5.2. Содержание файла «справочник пользователя»

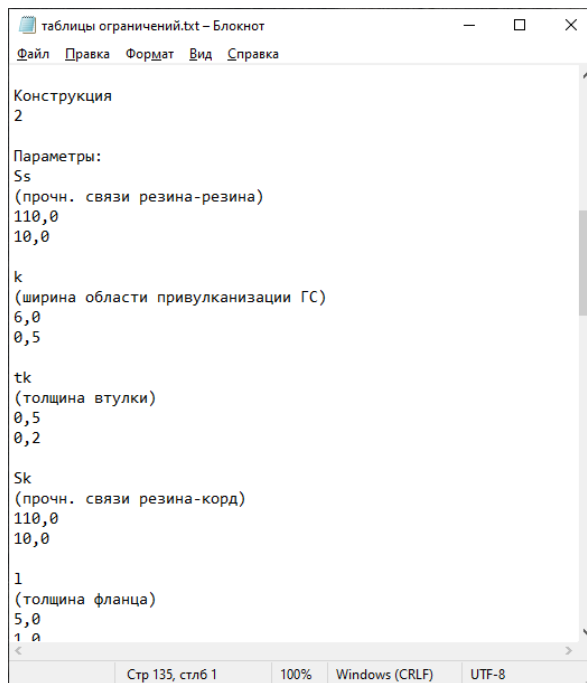


Рис. 5.3. Содержание файла «таблицы ограничений»

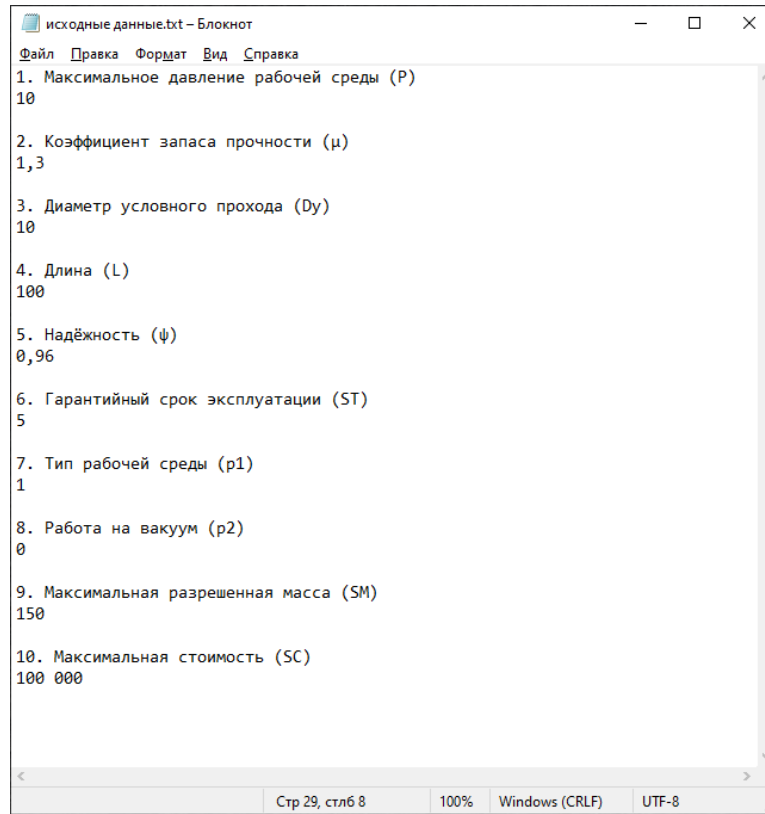


Рис. 5.4. Содержание файла «исходные данные»

служебный файл.txt – Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

1000.000	1000.000	1000.000	1000.000	1000.000	1000.000		3.222	0.053	2.123	0.		
3.075	-0.06	1.942	0.974	3.065	0.993		3.075	-0.06	1.942	0.974	3.065	0.
2.963	-0.01	1.979	0.953	2.934	0.980		2.963	-0.01	1.979	0.953	2.934	0.
2.986	-0.02	2.049	1.020	3.087	1.013		2.986	-0.02	2.049	1.020	3.087	1.
3.012	-0.01	1.900	1.023	2.996	0.988		3.012	-0.01	1.900	1.023	2.996	0.
3.009	-0.01	1.917	1.029	3.154	0.989		3.009	-0.01	1.917	1.029	3.154	0.
2.784	0.005	2.016	1.012	3.005	1.043		2.784	0.005	2.016	1.012	3.005	1.
3.084	0.095	1.968	0.978	2.954	0.992		3.084	0.095	1.968	0.978	2.954	0.
3.314	-0.06	2.114	1.006	2.978	1.001		3.314	-0.06	2.114	1.006	2.978	1.
3.091	-0.02	2.023	1.004	3.025	0.980		3.091	-0.02	2.023	1.004	3.025	0.
2.978	0.040	1.974	1.038	3.124	0.992		2.978	0.040	1.974	1.038	3.124	0.
2.972	-0.10	1.944	1.035	3.103	0.976		2.972	-0.10	1.944	1.035	3.103	0.
2.866	-0.06	1.940	0.997	3.016	1.010		2.866	-0.06	1.940	0.997	3.016	1.
2.712	-0.05	1.953	0.972	2.911	0.999		2.712	-0.05	1.953	0.972	2.911	0.
3.295	0.064	1.970	1.049	2.998	0.974		3.295	0.064	1.970	1.049	2.998	0.
2.795	0.036	1.934	1.013	2.893	1.006		2.795	0.036	1.934	1.013	2.893	1.
2.698	0.017	1.936	1.004	3.114	1.005		2.698	0.017	1.936	1.004	3.114	1.
2.883	-0.05	2.014	1.018	2.983	0.999		2.883	-0.05	2.014	1.018	2.983	0.
2.825	-0.08	2.049	0.984	2.969	1.008		2.825	-0.08	2.049	0.984	2.969	1.
2.985	-0.03	1.877	1.010	3.023	1.004		2.985	-0.03	1.877	1.010	3.023	1.
2.999	-0.00	2.046	1.014	2.987	1.000		2.999	-0.00	2.046	1.014	2.987	1.
3.066	0.043	2.114	1.001	2.956	1.004		3.066	0.043	2.114	1.001	2.956	1.
3.338	-0.09	1.837	0.997	2.937	1.001		3.338	-0.09	1.837	0.997	2.937	1.
3.119	0.002	1.940	0.975	2.974	0.935		3.119	0.002	1.940	0.975	2.974	0.
2.913	-0.01	2.004	1.020	2.995	1.042		2.913	-0.01	2.004	1.020	2.995	1.

Стр 1, столб 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Рис. 5.5. Содержание файла «служебный файл»

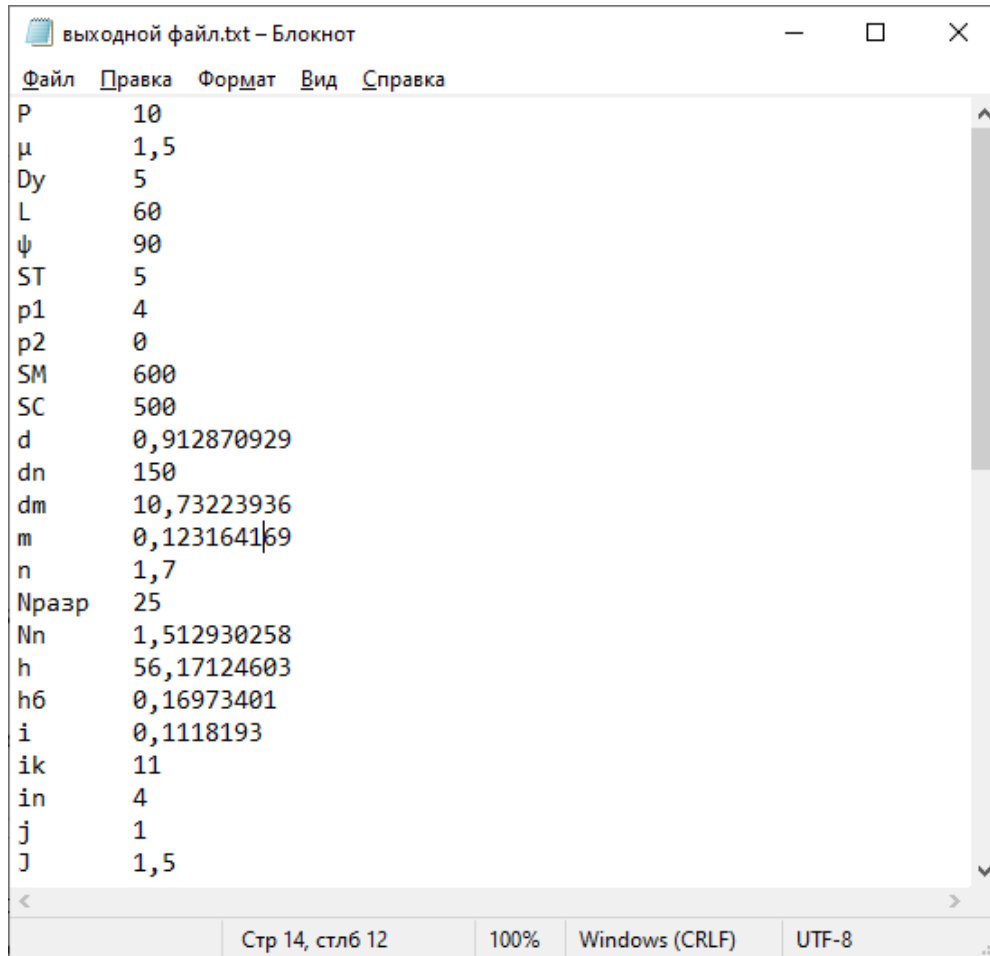


Рис. 5.6. Содержание файла «выходной файл»

Служебный файл содержит временные данные программы и может использоваться разработчиком для её диагностики. Для повышения надежности программы данный файл необходимо защищать от редактирования [153], однако в программе эта функция не реализована.

Для удобства дальнейшего использования, в выходной файл записывается полная математическая модель, включая введенные пользователем исходные данные, выбранные из БД значения и рассчитанные параметры всех заложенных в математическую модель конструкций. Для упрощения реализации программы, размерность величин не указывается в выходном файле, а указана в руководстве пользователя.

Файл «справочные данные» является наиболее объемным из всех служебных файлов программы. Значения, для хранения которых традиционно применяются таблицы БД, в данный файл записываются последовательно в столбик. Неудобством является отсутствие каких-либо ключевых «ячеек» и связей между ними, что повышает трудоёмкость внесения новых данных [154]. Для практического использования программы справочные данные необходимо перенести в современную БД. Однако для исследования и тестирования оставлена текстовая реализация.

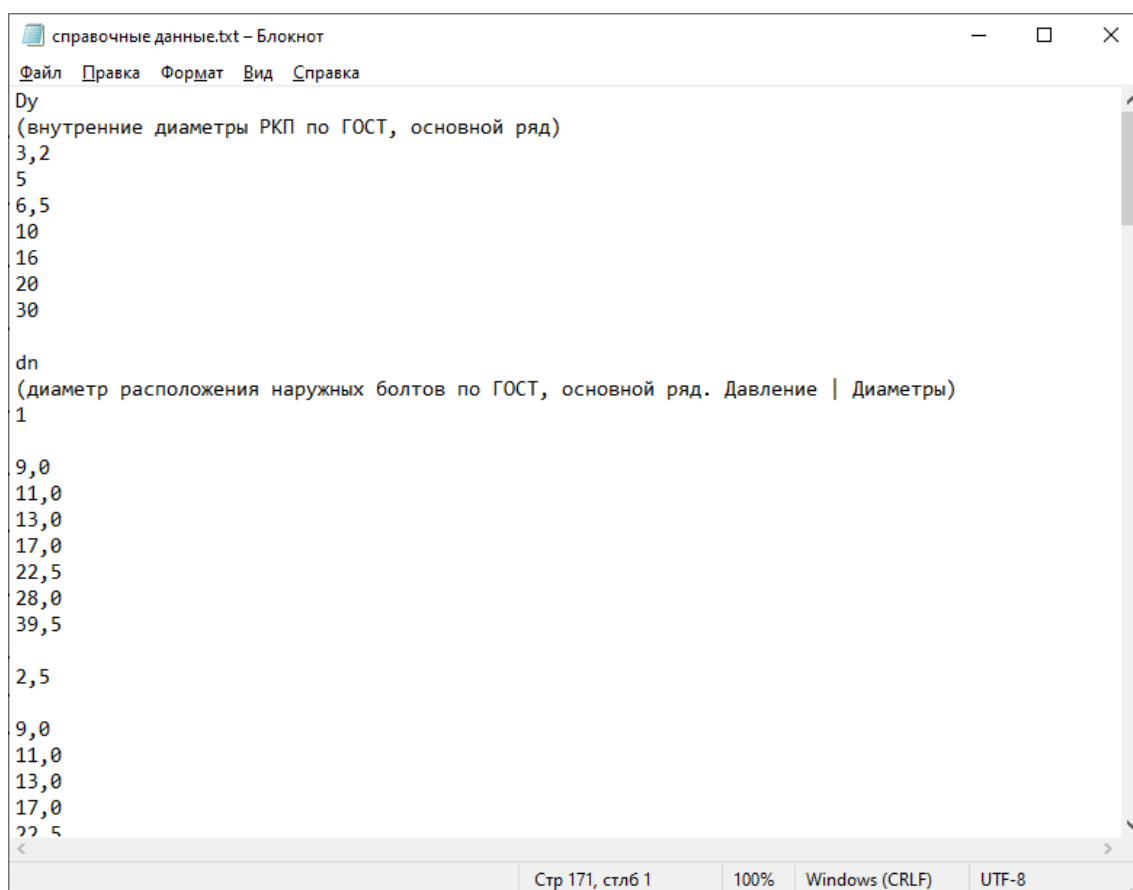


Рис. 5.7. Содержание файла «справочные данные»

Актуализация ИО разработанной подсистемы производится двумя путями:

1. В процессе работы с системой пользователь может исправлять исходные данные для проектирования, справочные данные и таблицы ограничений в соответствующих файлах;

2. В соответствии с инструкциями из руководства пользователя, в промежутках между сеансами работы с системой пользователь может корректировать файл «уравнения».

Описанные средства информационного обеспечения удовлетворяют всем предъявленным к ним требованиям.

5.2 Структура подсистемы

Вначале рассмотрим общие требования к программной реализации САПР. Наибольшее распространение получили следующие требования к автоматизированным системам (в т. ч. их программному обеспечению) в промышленности: такие системы должны разрабатываться с соблюдением принципов системности, развития (открытости), совместимости, стандартизации (унификации) и эффективности [155, 156].

Эти принципы продиктованы как многолетней практикой разработчиков, так и условиями рынка ПО автоматизированных систем [157], [158].

Принцип системности заключается в том, что программный продукт должен представлять собой цельную систему, имеющую также интерфейс для взаимодействия с другими системами [159]. Это помогает разработчикам сохранить идею проекта и реализовать её наиболее оптимально, не отвлекаясь на реализацию вспомогательного функционала.

Принцип развития (открытости) – в соответствии с ним, архитектура системы должна предполагать возможность её дополнения и модифицирования. Поскольку в процессе эксплуатации системы неизбежно возникает необходимость её модифицирования, внесение таких изменений должно быть как можно менее трудоёмким, а также не должно влиять на её работоспособность.

Принцип совместимости гарантирует, что программа поддерживает обмен данными по стандартизированным протоколам. В соответствии с ГОСТ 34.003-90, совместимость автоматизированных систем подразумевает, что они могут обмениваться данными даже непосредственно в процессе своей работы [160].

Совместимость также может обеспечиваться на других уровнях взаимодействия – к примеру, на уровне аппаратных компонентов или общей информационной среды.

Принцип стандартизации является более общим и рекомендует использовать при разработке только стандартизированные алгоритмы, программные компоненты, интерфейсы и т.д. Внедрение стандартных решений зачастую положительно сказывается на многих аспектах – скорости разработки программы, надёжности её работы, качестве документации, стоимости поддержки. Положительный эффект при этом тем больше, чем больше объем программного кода и длительность эксплуатации системы. Проблема широкого использования стандартизации заключается в том, что внедрение решений, удачных для одних областей, в других областях может потребовать значительного времени или не принести ожидаемого эффекта. На практике шире применяется стандартизация не целых систем, а их отдельных компонентов.

Принцип эффективности требует, чтобы целесообразность внесения тех или иных изменений определялась не только их практическим эффектом, но и требуемыми затратами. В общем случае процесс разработки и совершенствования программы можно продолжать неограниченное время. Таким образом, момент выпуска продукта или промежуточного релиза в эксплуатацию не может быть определен как «момент завершения разработки».

Другие распространённые требования (наличие развитых средств диагностики, надёжность, мобильность и т.д.) менее актуальны для разрабатываемой программы и далее не рассматриваются.

При наличии информационного обеспечения в виде базы данных, программа может быть разделена на отдельные модули, которые обращаются к БД и выполняют свои функции независимо от других модулей. Хотя такая структура предоставляет большую расширяемость и надёжность, её создание является более трудоёмким [161]. Поскольку в разрабатываемой программе вычисления выполняются преимущественно при работе генетического алгоритма, решено интегрировать модуль работы с БД и решатель в одно приложение.

В соответствии с выбранными принципами составлена архитектура прикладной программы, представленная на рисунке 5.8.

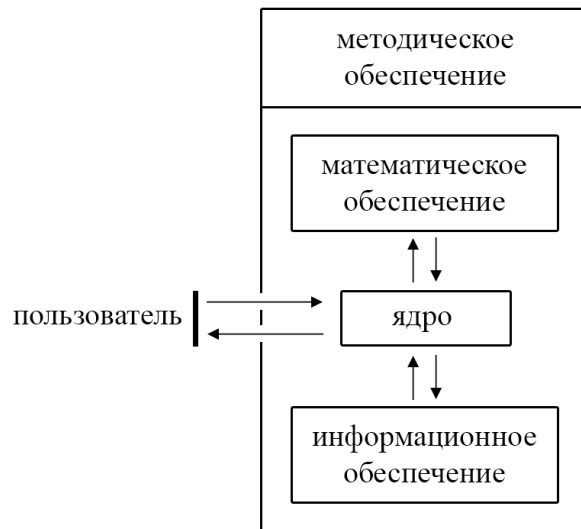


Рис. 5.8. Схема прикладной программы

Под ядром понимается программа, написанная на языке программирования высокого уровня, и осуществляющая взаимодействие с пользователем, информационным и математическим обеспечением [162]. Состав информационного обеспечения рассмотрен в разделе 5.1; математическое обеспечение содержится в программном коде в блоке циклической оптимизации; методическое обеспечение не содержится в программе в явном виде, а определяет логику её работы.

Алгоритм работы с программой в процессе проектирования типоряда РКП будет представлять собой искомый алгоритм автоматизации проектирования типорядов изделий. Данный алгоритм представлен на рисунке 5.9.

Программа реализована на языке C++ в виде консольного приложения. Выбор языка C++ обусловлен его преимуществами:

- распространённость;
- большое количество разработанных библиотек и фрагментов кода;
- развитое сообщество [163], [164].

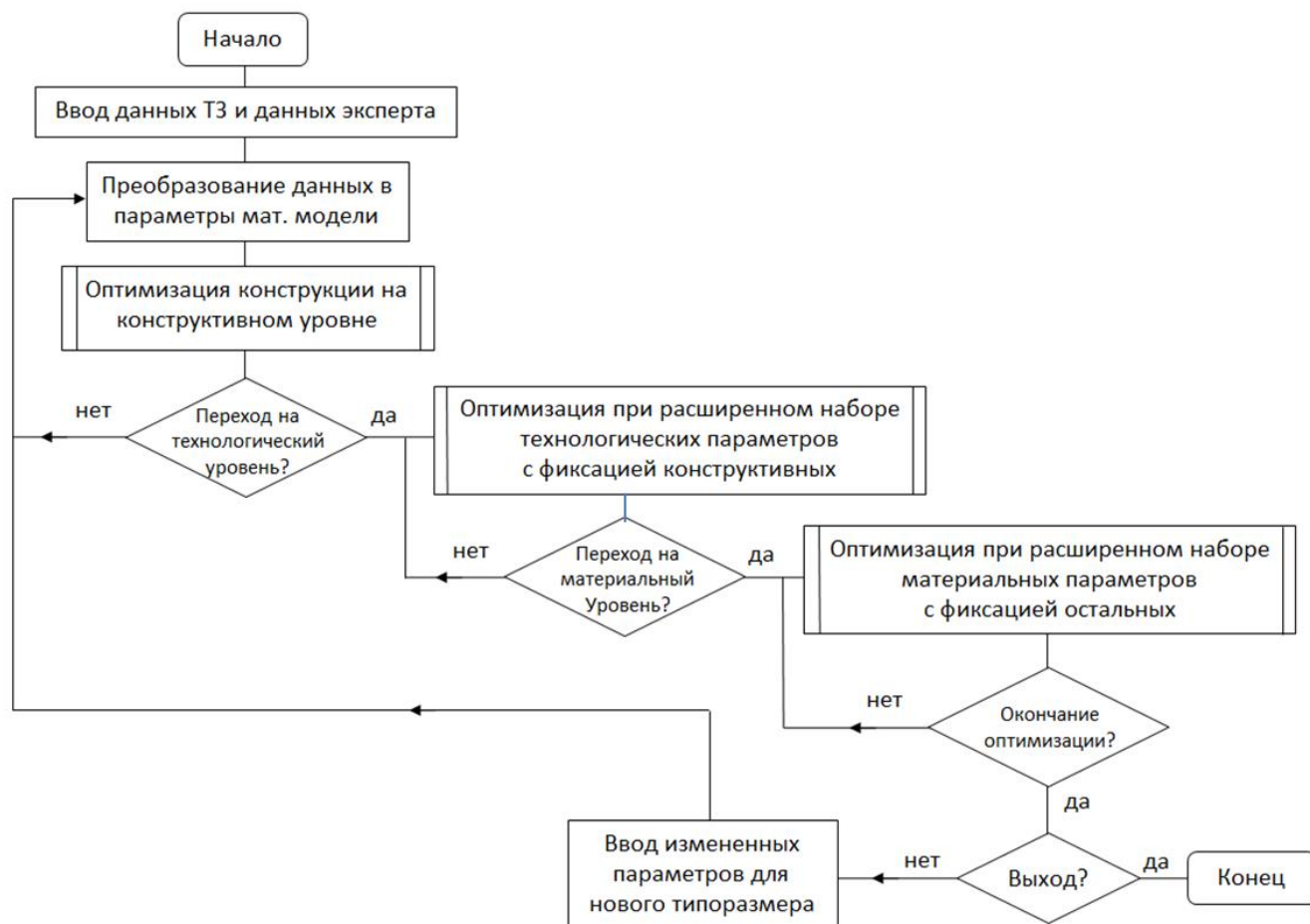


Рис. 5.9. Алгоритм автоматизации проектирования типорядов изделий

5.3 Внедрение подсистемы

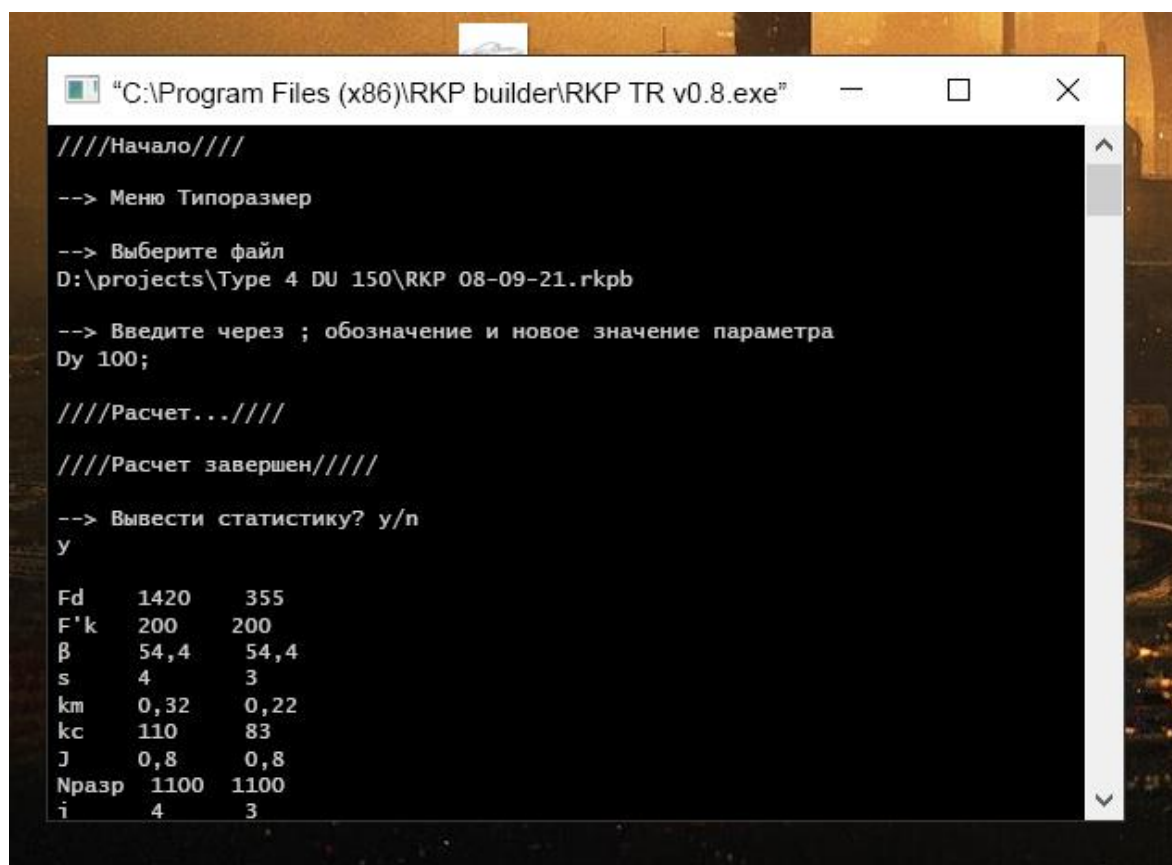
Пробная эксплуатация проводилась на ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» при проработке заказа на серию РКП с рабочим давлением 30 кг/см². Скриншот программы после проработки типоряда приведен на рисунке 5.10, сгенерированный файл – на рисунке 5.11.

Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы № 16 от 30.07.2020 г.

Поскольку полученная программа позволяет автоматизировать расчеты конструкций РКП в зависимости от применяемых материалов, она нашла применение при решении задачи выбора поставщиков материалов для изготовления партий РКП.

Практическая эксплуатация программы выявила дополнительное преимущество используемого модифицированного алгоритма оптимизации. Использование рецессивных генов повысило приемственность технических решений в изделиях типоряда: по сравнению с повторными запусками немодифицированного алгоритма, найденные технические решения гарантированно используют часть найденных ранее параметров конструкции [165].

Поскольку выходными данными подсистемы являются параметры конструкции РКП, для практической эксплуатации выходной файл подсистемы может быть связан с параметризованным чертежом – пример такого чертежа показан на рисунке 5.12. РКП является телом вращения, поэтому получение его трёхмерной модели из параметризованного чертежа выполняется тривиально.



```
“C:\Program Files (x86)\RKP builder\RKP TR v0.8.exe”
////Начало////
--> Меню Типоразмер
--> Выберите файл
D:\projects\Type 4 DU 150\RKP 08-09-21.rkp
--> Введите через ; обозначение и новое значение параметра
Du 100;
////Расчет...////
////Расчет завершен////
--> Вывести статистику? у/п
у
Fd    1420    355
F'k   200     200
β     54,4    54,4
s     4       3
km    0,32    0,22
kc    110     83
J     0,8     0,8
Nразр 1100    1100
i     4       3
```

Рис. 5.10. Сеанс работы реализованной программы

```

projekt 1.txt — Блокнот
Файл Правка Формат Вид Справка
проект РКП "без названия"
Дата: 25.10.17. Оператор 1
-----
максимальное давление рабочей среды (мпа) | 4
запас прочности                             | 2
внутренний диаметр, м                       | 0,05
надёжность                                  | 0,999
гарантийный срок, лет                       | 15
тип рабочей среды                           | воздух
минимальное рабочее давление, мпа          | 0
масса, кг                                  | 5,0
-----
Тип конструкции: 4
Геометрические параметры, мм:
Dy = 50
dn = 85
n = 10
in = 12
l1 = 16
l2 = 16
im = 16
dm = 108
m = 6
g = 6
k = 40
tk = 5
s = 4
t = 6
i = 2
d = 8
a, град = 48,5
-----
Технологические параметры
марка армирующего материала                | Капрон200
марка резины покровного слоя                | И-73М
марка резины герметизирующего слоя         | И-33-08
размеры раскроя материалов, мм             | 500x100
марка материала металлоарматуры           | Сталь 20 ГОСТ 1050-2013
марка материала бортовых колец             | Сталь 20 ГОСТ 1050-2013
марка материала обжимных болтов            | Сталь 30ХГСА ГОСТ 1050-2013
радиус сборочного барабана, мм            | 45
угол закроя материала на сборочном барабане, град | 55,0
|

```

Рис. 5.11. Сгенерированный файл с результатами работы программы

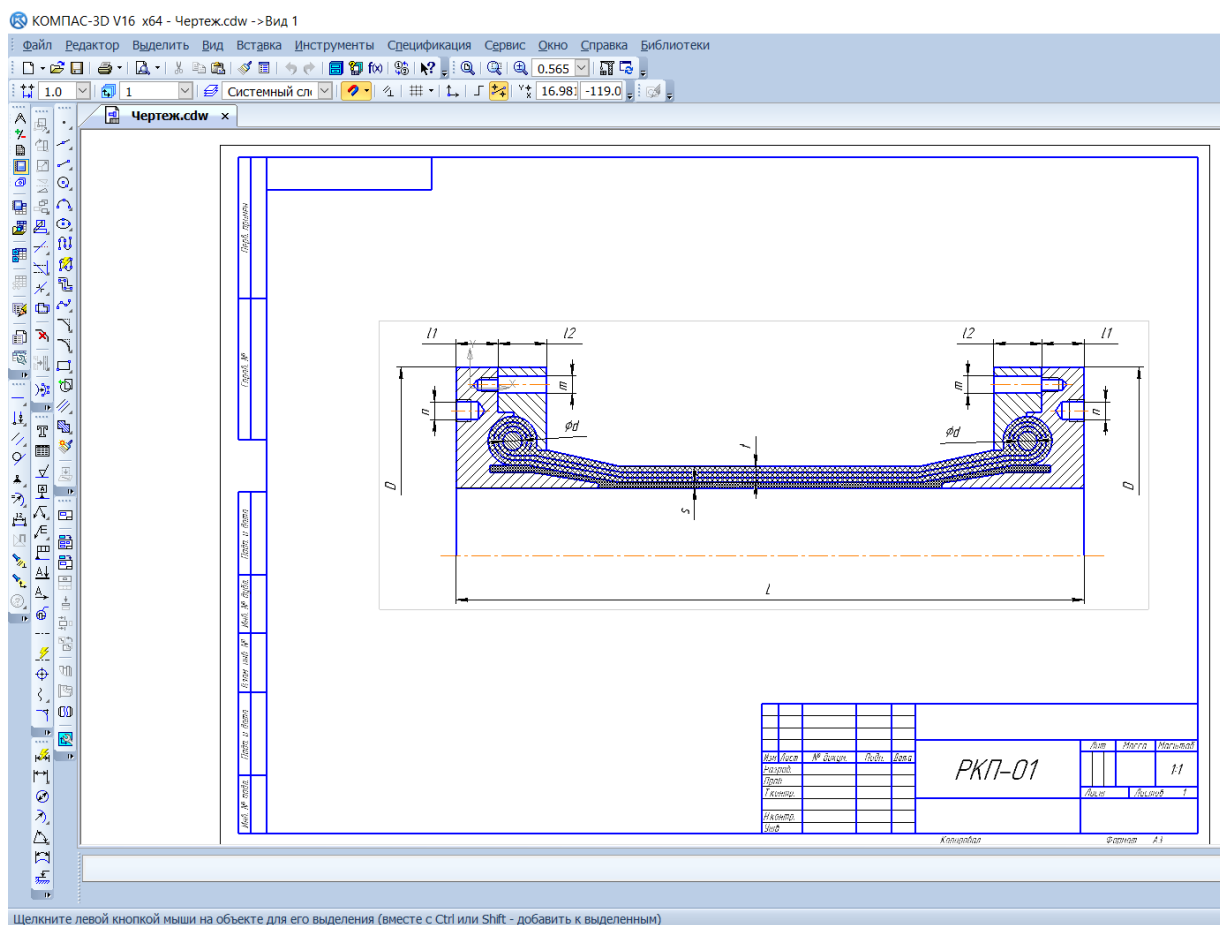


Рис. 5.12. Параметризованный чертеж с параметрами РКП, соответствующими выходным данным разработанной подсистемы

Выводы по главе 5

Определено, что корректная программная реализация разработанной методики и алгоритма возможна в виде системы автоматизированного проектирования. Для реализации такой системы разработано информационное обеспечение в виде текстовых файлов с данными, необходимыми для работы программы, а также алгоритм взаимодействия «пользователь-САПР». Данный алгоритм реализован на языке высокого уровня в соответствии с принципами разработки автоматизированных систем. Полученная программа успешно протестирована и внедрена в практическую эксплуатацию.

Заключение

В диссертационной работе в результате проведенных исследований и вычислительных экспериментов разработаны методика, математическое обеспечение и алгоритм численной оптимизации для проектирования типорядов изделий на примере резинокордовых патрубков. Выполнена реализация предложенных методик и алгоритмов в виде подсистемы инженерных расчетов, опробованной в практической эксплуатации.

В соответствии с целью и задачами исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана новая методика автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков, которая отличается включением в неё методов экспертных систем и численной оптимизации. Разработанная методика позволяет формулировать требования к интеллектуальным подсистемам САПР, что упростит их разработку, а при их внедрении – повысит эффективность и расширит возможности новых САПР.

Соответствие п. 1 паспорта специальности: «Методология компьютерного моделирования и автоматизированного проектирования в технике и технологиях, включая постановку, формализацию и типизацию проектных и технологических процедур, алгоритмов и процессов проектирования».

2. Разработаны новые математические модели шести конструкций РКП, которые отличаются совместным использованием системных, конструктивных и технологических параметров конструкции. Полученные математические модели определяют соотношения между пятьюдесятью параметрами, которые могут быть использованы как для прикладных расчётов изделий (сокращение времени проектирования, повышение надёжности изделий), так и для дальнейшего совершенствования математического аппарата по проектированию гибких оболочек.

Соответствие п. 6 паспорта специальности: «Разработка компьютерных моделей, алгоритмов, программных комплексов оптимального проектирования технических изделий и процессов».

3. Разработан модифицированный алгоритм дифференциальной эволюции, который отличается использованием рецессивных и доминантных генов при генерации поколений промежуточных решений. Модифицированный алгоритм показал более высокую эффективность при решении ряда последовательных задач. Определены области наибольшей эффективности модифицированного алгоритма, что упрощает внедрение и дальнейшие теоретические исследования алгоритма. Предложенный алгоритм также решает последовательные задачи минимизации без возврата к начальному состоянию популяции, что экономит временные и вычислительные ресурсы при выполнении расчётов.

Соответствие п. 6 паспорта специальности: «Разработка компьютерных моделей, алгоритмов, программных комплексов оптимального проектирования технических изделий и процессов».

4. Предложенная методика и алгоритм оптимизации дополнены информационным обеспечением и реализованы на языке программирования высокого уровня в виде подсистемы инженерных расчетов, в результате автоматизировано проектирование типорядов резинокордовых патрубков, что сократило время их проектирования и повысило качество проектных решений (единообразие конструктивных решений в рамках одного типоряда). Результаты диссертации получили внедрение в ФГУП «ФНПЦ «Прогресс», что подтверждается соответствующим актом о внедрении, приведенным в приложении А.

5. Теоретические результаты работы используются в образовательном процессе ОмГТУ при выполнении лабораторных работ на факультете элитного образования и магистратуры что подтверждается актом, приведенным в приложении Б. Результаты проведенных исследований включены в электронное учебное пособие «Системы автоматизации проектирования в машиностроении».

Из предложенной методики проектирования типорядов рассмотрена и исследована только часть, относящаяся к численной оптимизации. Часть, относящаяся к инженерии знаний, заменена диалогом с пользователем-экспертом. В методическом плане эти решения являются эквивалентными, однако при практической эксплуатации принятое решение означает отсутствие автоматизации этапа принятия решений, то есть снижение скорости работы и зависимость от конкретного пользователя. Таким образом, для полной реализации потенциала предложенной методики она должна быть дополнена автоматизацией принятия проектных решений на основе знаний.

Кроме того, приведенная в работе реализация предложенной методики использует только заранее подготовленные математические модели изделий, что существенно ограничивает её применение. Для внедрения данной методики в новую предметную область необходимо составлять новое пространство параметров и целевую функцию. Указанный недостаток отчасти компенсируется тем, что для многих предметных областей (проектируемых в промышленности объектов) уже существует достаточно развитый аппарат аналитического расчета. К таким областям можно отнести проектирование типорядов подъемно-транспортного оборудования и модульных зданий.

Полученные в работе теоретические результаты могут быть использованы при исследовании вопроса дальнейшего внедрения технологий искусственного интеллекта в САПР, что, в свою очередь, должно кардинально расширить их функциональность.

Список сокращений и условных обозначений

БД – база данных

БК – бортовое кольцо (РКП)

ГА – генетический алгоритм (оптимизации)

ИС – информационная система

КЭ – конечные элементы

ММ – математическая модель

МКЭ – метод конечных элементов

НС, ИНС – искусственная нейронная сеть

НДС – напряжённо-деформированное состояние

ПО – программное обеспечение

РКО – резинокордная оболочка

РКП – резинокордный патрубок

САПР – система автоматизированного проектирования

ЦФ – целевая функция

Список литературы

1. Klimentyev E.V., Zvonov A.O., Glazkova E.U. Rubber-cord cushions application in modern engineering // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics): 2014. 2014. pp. 1-5.
2. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике: изд. 8-е. М.: Наука, 1977. 440 с.
3. Гусев Б.В., Оленич Д.И., Нурыева М. Применение методов теории подобия и анализа размерностей при изучении волновых явлений // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2017. № 9-10. С. 56-57.
4. Козлов А.А., Тарануха Н.А. Проектирование и изготовление моделей судов для экспериментальных исследований теории подобия неподобных, но сходственных тел // Материалы 47-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре. 2017. С. 518-522.
5. Бубенчикова Т.В., Молодых В.О., Руденок А.И. и др. Метод теории подобия ветроэнергетических установок // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. Вып. № 12 (54), ч. 3. С. 50-53.
6. Anandan S., Teegavarapu S., Summers J. D. Issues of similarity in engineering design // Proceedings of IDETC/CE 2006 ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information Engineering Conference September 10-13, 2006. pp. 73-82.
7. Hou, C. L., Jiang, Y. S., Qi, X. Z., We, X. Application of Similarity Theory in Research on Consistency in Multi-Resolution Modeling // China Advanced Materials Research Vol. 562-564, 2012. pp. 2128-2133.
8. Методические указания. Унификация изделий. Построение параметрических и типоразмерных рядов деталей и сборочных единиц общемашиностроительного применения РД 50-632-87 // Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. 44 с.

9. Унификация изделия. Основные положения. Переиздание с изменением № 1 // М.: Издательство стандартов, 1988. 7 с.
10. Кремьянский В.Я., Способ различий в нагрузках при оптимизации рядов унифицированных деталей // М: Стандарты и качество. № 1, 1976. С. 58-59.
11. Звонов А.О., Янишевская А.Г. Построение аналитической модели профиля манжетного уплотнения // Программные системы и вычислительные методы. № 3, 2020. С. 10-18.
12. Зубарев А.В., Климентьев Е.В., Звонов А.О., Бублик Д.Н. Стенд для динамических испытаний пневмоэлемента с подключаемым дополнительным объемом // Материалы 26-го Международного симпозиума «Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов», 2015. С. 132-136.
13. Аникин Е.С., Звонов А. О. Проектирование пневматической системы виброизоляции грохота инерционного // Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от повышенного шума и вибрации», 2015. С. 300-305.
14. Аникин Е.С., Погорелый Б.Ф., Онуфриенко А.В. Резинокордная оболочка // Патент России № 2369786. Опубл. 10.10.2009. Бюл. № 28.
15. Вакулов Н.В., Мышлявцев А.В., Звонов А.О., Малютин В.И. Повышение точности прогнозирования характеристик резин при старении // Сборник трудов XXIII научно-практической конференции «Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии», 2018. С. 52-56.
16. Вакулов Н.В., Мышлявцев А.В., Малютин В.И., Звонов А.О. Прогнозирование срока службы резин и резинотехнических изделий при помощи расчетных программ в системе MATLAB // Сборник докладов XXII научно-практической конференции «Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии», 2017. С. 169-172.
17. Вакулов Н.В., Мышлявцев А.В., Малютин В.И., Звонов А.О. Использование расчетных программ для прогнозирования срока службы резин и резинотехнических изделий // Каучук и резина. № 1 (77), 2018. С. 52-57.

18. Аникин Е.С., Зубарев А.В., Звонов А.О., Климентьев Е.В., Онуфриенко А.В. Устройство крепления арматуры оболочек вращения // Патент России № 2534260. Оpubл. 27.11.2014. Бюл. № 33.

19. Аникин Е.С., Онуфриенко А.В., Щепетков В.А., Зубарев А.В., Климентьев Е.В., Звонов А.О. Резинокордный элемент // Патент России № 2564732. Оpubл. 10.10.2015. Бюл. № 28.

20. Аникин Е.С., Зубарев А.В., Климентьев Е.В., Звонов А.О. Резинокордный элемент // Патент России № 2636976. Оpubл. 29.11.2017. Бюл. № 34.

21. Аникин Е.С., Баженов А.М., Зубарев А.В., Осипов А.В., Корунов Д.А., Звонов А.О. Устройство крепления арматуры гибкого рукава // Патент России № 2639468. Оpubл. 21.12.2017. Бюл. № 36.

22. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд, 1989. 254 с.

23. Трибельский И. А., Шалай В.В., Зубарев А.В. Расчётно-экспериментальные методы проектирования сложных резинокордных конструкций. Омск: ОмГТУ, 2011. 240 с.

24. Евдокимов А.П. Экспериментальные исследования многослойной упругой оболочки соединительной муфты силовых приводов // Информационно-технологический вестник. № 3 (5), 2015. С. 68-80. DOI: 10.21499/2409-1650-2015-3-68-80.

25. Бидерман В.Л. Расчет формы профиля и напряжений в элементах пневматической шины, нагруженной внутренним давлением // Сборник трудов НИИШП. № 3, 1957. С. 16-51.

26. Clark S.K. Mechanics of pneumatic tires. Washington D.C.: U.S. Department of transportation - National highway traff safety administration, 1981. 931 p.

27. Бухин Б.Л. Расчет равновесной конфигурации пневматической шины с учетом удлинения нитей корда // Каучук и резина. № 10, 1963. С. 35-38.

28. Бидерман В.Л., Бухин Б.Л., Николаев И.К., Сметанкина Р.Н. Атлас номограмм равновесных конфигураций пневматических шин. М.: Химия, 1967. 36 с.

29. Zorowski C., Dunn S., Shah N.. The Influence of Geometric and Cord-Load Design Parameters on the Profile Shape and Cord Tensions in Inflated Pneumatic Tires // Textile Res. Journal. Vol. 41, no. 6, 1971. pp. 501–509. DOI: 10.1177/004051757104100605.

30. Мухин О.Н. Автоматизированный поверочный расчет механических характеристик шины меридиональной конструкции // Сборник трудов конференции «Механика, пневматических шин как основа рационального конструирования и прогнозирования эксплуатационных свойств», 1974. С. 26-44.

31. Belkin A.E., Bukhin B.L., Mukhin O.N., Narskaya N.L. Some models and methods of pneumatic tire mechanics // Proceedings of the 2nd International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis, 1997. pp. 250-271.

32. Мухин О.Н. Расчет механических характеристик меридиональной шины, обжатой на барабан // Сборник трудов симпозиума «Механика пневматических шин», 1976. - С. 136-147.

33. Григолюк Э. И., Шалашилин В. И. Метод продолжения по параметру в задачах нелинейного деформирования стержней, пластин и оболочек // Исследования по теории пластин и оболочек, № 1 (17), 1984, С. 3–58.

34. Григолюк Э.И., Корнейчук Л.Г., Куликов Г.М., Носатенко П.Я. Напряженно-деформированное состояние современных шин // Механика композитных материалов, № 2, 1984, С. 296-307.

35. Бухин Б.Л., Гильдман И.М., Каплинский Э.М. Симметричная деформация безмоментной сетчатой оболочки вращения // Каучук и резина, № 11, 1969. С. 36-39.

36. Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Численное решение задач статики геометрически нелинейных анизотропных многослойных оболочек вращения // Механика композитных материалов. 1981. № 3. С. 443-452.

37. Koga H., Okamoto K., Tosawo Y. Stress analysis of tire under vertical load by a finite element method // *The Science and Technology*. 1977. Vol. 5, № 2. P. 102-118.
38. Трибельский И.А., Зубарев А.В. Метод расчетного исследования прочности и рабочих параметров герметизаторов с резинокордными оболочками различных конструкций // *Вестник машиностроения*. 2008. № 7. С. 8-10.
39. Трибельский И.А. Бортовые соединения резинокордных конструкций. Омск: ОмГТУ, 2011. 130 с.
40. Patel H.P., Kennedy R.H. Nonlinear finite element analysis for composite structures of axisymmetric geometry and loading // *Computers and Structures*, 1982. Vol. 15, № 1. P. 79-84.
41. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 393 с.
42. Скворцов Ю. В., Глушков С.В., Хромов А.И., Моделирование композитных элементов конструкций и анализ их разрушения в САЕ-системах MSC Patran-Nastran и ANSYS. Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм. ун-та, 2012. 148 с.
44. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. М.: ДМК Пресс, 2011. 332 с.
45. Звонов А.О., Янишевская А.Г. Расчет процессов объемного сжатия композиционных материалов с полимерной матрицей в современных САЕ-системах // *Автоматизация и современные технологии*. 2014. № 7. С. 24-26.
46. George F. Luger *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving* (6th Edition). Boston: Addison Wesley, 2008. 779 P.
47. Куприянов В.В., Печенкин О.Ю., Суслов М.Л. САПР и системы искусственного интеллекта на базе ЭВМ. М.: Наука, 1991. 159 с.
48. Ten Hagen. P.J.W., Tomiyama T. eds. *Intelligent CAD Systems I: Theoretical and Methodological Aspects*, 1987. 360 p.
49. Akman, V., ten Hagen. P.J.W., Veerkamp, P.J. eds. *Intelligent CAD Systems II: Implementational Issues*. Berlin: Springer, 1989. 324 p.

50. Ten Hagen. P.J.W., Veerkamp, P.J. eds. Intelligent CAD Systems III: Practical Experience and Evaluation. Berlin: Springer, 1991. 270 p.
51. Zha Xuan F., Howlett R.J. Integrated Intelligent Systems for Engineering Design. Amsterdam: IOS Press, 2006. 432 p.
52. Newell A., Shaw J. C., Simon H. A. Empirical explorations of the logic theory machine: a case study in heuristic // Papers of western joint computer conference: Techniques for reliability. NY: Association for Computing Machinery, 1957. P. 218–230. DOI: 10.1145/1455567.1455605
53. Newell A., Simon, H. A. GPS, a program that simulates human thought // In E. A. Feigenbaum & J. Feldman (ed.), Computers and Thought. NY: McGraw-Hill, 1963. P. 279-293.
54. Ruiz–Reina J. Proving and Computing: Applying Automated Reasoning to the Verification of Symbolic Computation Systems (Invited Talk) // AISC 2014: 12th International Conference on Artificial Intelligence and Symbolic Computation, 2014. P. 1-6.
55. Lindsay R. K., Buchanan B. G., Feigenbaum E. A., Lederberg J. Applications of artificial intelligence for organic chemistry: the DENDRAL project. New York: McGraw-Hill, 1980. 203 p.
56. Buchanan B. G., Shortliffe E. H. Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project. MA: Addison-Wesley, 1984. 754 p.
57. Звонов А.О., Янишевская А.Г. Разработка экспертной системы поддержки проектирования многослойных оболочек // Материалы Всероссийской молодежной конференции Информационно-телеком-муникационные системы и технологии (ИТСиТ-2012). Кемерово: КузГТУ, 2012. С. 99-100.
58. Giarratano J.C., Riley G. Expert Systems: Principles and Programming. MA: PWS Publishing, 1994. 644 P.

59. Ferrucci D., Brown E., Carroll J.C. and others Building Watson: An Overview of the Deep QA Project // AI Magazine. Vol. 31, no. 3, pp. 59-79. DOI: 10.1609/aimag.v31i3.2303
60. Канеман Д. Думай медленно... решай быстро. М.: АСТ, 2021. 656 С.
61. Lewis J. A., Luger G. F. A constructivist model of robot perception and performance // Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society. Vol. 22. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 2000. pp. 788-793.
62. Brooks R. A. Intelligence without reason // Proceedings of the 12th international joint conference on Artificial intelligence. Vol. 1. Massachusetts: MIT, 1991. pp. 569–595.
63. Lenat B.D. The nature of heuristics // Artificial Intelligence. Vol. 19, Issue 2. 1982. pp. 189-249. DOI: 10.1016/0004-3702(82)90036-4.
64. Randall D., Buchanan B.C. Meta-level knowledge: overview and applications // Proceedings of the 5th international joint conference on Artificial intelligence. Vol. 2. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1977. pp. 920–927.
65. Wang X., Han Y., Wang C., Zhao Q., Chen X., Chen M. In-Edge AI: Intelligentizing Mobile Edge Computing, Caching and Communication by Federated Learning // IEEE Network. Vol. 33. pp. 156-165. DOI:10.1109/MNET.2019.1800286.
66. Rosenblatt. F. The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain // Psychological Review. Vol. 65 (6), 1958. pp. 386–408. DOI: 10.1037/h0042519.
67. Звонов А.О. Проблема визуализации нейронной сети произвольной структуры // Информационные технологии в науке и производстве. Материалы молодежной научно-технической конференции, 2014. с. 8-12.
68. Звонов А.О. Современная терминология искусственного интеллекта в английском языке // Изучение терминологии как составляющая подготовки специалиста. Материалы I международной научно-практической конференции, 2011. с. 58.

69. Звонов А.О., Янишевская А.Г. Методы искусственного интеллекта в задачах автоматизации принятия проектных решений // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 10. С. 18-21.
70. Звонов А.О. Перспективы применения интеллектуальных САПР при проектировании многослойных оболочек // Новые материалы и технологии. Материалы Всероссийской научно-технической конференции, 2012. С. 244-245.
71. Подольский В.Е., Коробова И.Л., Милованов И.В., Дьяков И.А., Майстренко Н.В. Методы искусственного интеллекта для синтеза проектных решений: учебное пособие. Тамбов: ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. 80 с.
72. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. М.: Энергоатомиздат, 1987. 400 с.
73. Звонов А.О. Использование резинокордных оболочек в современном машиностроении // Динамика систем, механизмов и машин, 2014. № 2. С. 293-296.
74. Эпов А. А., Ломкова Е. Н., Казначеева А. А., Шкода И. А. Разработка САПР (Теоретические основы). Волгоград: ВолгГТУ, 2007. 96 с.
75. Nocedal J., Wright S. Numerical optimization. NY: Springer, 2006. 664 p.
76. Звонов А.О. Задача анализа вариантов технических решений в системах автоматического проектирования // Сборник трудов конференции Россия молодая: передовые технологии – в промышленность, 2013. № 2. С. 36-38.
77. Деньдобренко Б. П., Малика А.С. Автоматизация проектирования радиоэлектронной аппаратуры. М.: Высшая школа, 1980. 384с.
78. Вермишев Ю. Х. Основы автоматизации проектирования. М.: Радио и связь, 1988. 280с.
79. Корнеев В.С., Корнеев С.А. Расчётно-экспериментальный метод определения начальных геометрических параметров резинокордных оболочек вращения // Омский научный вестник. Серия авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. Том 3, № 2, 2019. С. 127-134. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-127-134.

80. Цысс В.Г., Сергаева М. Ю. Оптимизация параметров корабельного резинометаллического амортизатора методом конечных элементов // Омский научный вестник, № 1 (117), 2013 г. С. 78-81.

81. Котов А. Г. САПР изделий из композиционных материалов. Моделирование процессов деформирования и разрушения в среде ANSYS: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т. 2008. 351 с.

82. Гасников, А. В. Современные численные методы оптимизации. Метод универсального градиентного спуска: учебное пособие, 2-е изд. М.: МФТИ, 2018. 291 с.

83. Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В., Беляев П.С., Однолько В.Г. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин. М.: Машиностроение-1, 2004, 248 с.

84. Dankwort, C.W.; Ovtcharova, J.; Weidlich, R. A Concept of Engineering Objects for Collaborative Virtual Engineering: Automotive Case Study // Proceedings of the ProSTEP iViP Science Days, Dresden, 2003, pp. 161-172.

85. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М.: Наука, 1983. 384 с.

86. Peypouquet J. Convex optimization in normed spaces: theory, methods and examples. NY: Springer, 2015. 124 p. DOI 10.1007/978-3-319-13710-0.

87. Chernov, A., Dvurechensky, P., Gasnikov, A.: Fast primal-dual gradient method for strongly convex minimization problems with linear Constraints // Conf. on Discrete Optimization and Operations Research (DOOR), 2016. vol. 9869, pp. 391–403. DOI: 10.1007/978-3-319-44914-2_31.

88. Simon D. Evolutionary optimization algorithms. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 776 p.

89. Карпенко А. П. Гибридные популяционные алгоритмы параметрической оптимизации проектных решений // Информационные технологии. 2013. № 12. С. 6-15.

90. Angeline P. J. Adaptive and self-adaptive evolutionary computations // Computational Intelligence: A Dynamic System Perspective, IEEE Press, 1995. pp. 152-163.
91. Zaharie D., Control of population diversity and adaptation in differential evolution algorithms // Proceedings of the 9th International Conference on Soft Computing, Brno, 2003. pp. 41-46.
92. Price K.V., Storn R.M., Lampinen J.A. Differential evolution: a practical approach to global optimization. Berlin: Springer, 2005. 558 p.
93. Gamprerle R., Muller S.D., Koumoutsakos P. A parameter study for differential evolution // Advances in Intelligent Systems, Fuzzy Systems, Evolutionary Computation, WSEAS Press, Interlaken, Switzerland, 2002. pp. 293-298.
9423. Das S., Konar A., Chakraborty U.K. Two improved differential evolution schemes for faster global search // Proceedings of the 2005 Conference on Generic and Evolutionary Computation, 2005. pp. 991-998.
95. Lampinen J., Zelinka I. On stagnation of the differential evolution algorithm // Proceedings of MENDEL 2000, 6th International Mendel Conference, 2000. pp. 76-83.
96. Storn R., Price K. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // Journal of Global Optimization, № 11, 1997. pp. 341-359.
97. Ronkkonen J., Kukkonen S., Price K.V., Real-parameter optimization with differential evolution // IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2005, pp. 506-513.
98. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. М.: Наука, 1986. 296 с.
99. Deb K., Srinivasan A. Innovization: Innovating design principles through optimization // Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation, 2006. pp. 1629–1636.
100. Иванов А.С. Конструируем машины. Шаг за шагом. В 2-х ч. Часть 1. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 328 с.

101. Звонов А.О., Янишевская А.Г. Математическая модель информационно-измерительного комплекса на промышленном предприятии // Автоматизация. Современные технологии. 2012. № 4. С. 16-20.
102. Taylor D.A. Introduction to marine engineering. 2nd ed. Oxford: Elseiver, 2003. 383 p.
103. Kaplunov J.D., Kossovich L.Yu, Nolde E.V. Dynamics of thin walled elastic bodies. London: Academic Press, 1998. 385 p.
104. Leissa A. Vibration of shells. Ohio: Ohio State Univercity, 1993. 389 p.
105. Qatu M.S. Vibration of laminated shells and plates. NY: Academic Press, 2004. 426 p.
106. Taylor J.L. Vibration analysis handbook 2nd ed. Oxford: Elseiver, 2003. 375 p.
107. Hatch M.R. Vibration simulation using MATLAB and ANSYS. NY: CRC press, 2001. 656 p.
108. Kollar L.P., Springer G.S. Mechanics of composite structures. Cambridge: Cambridge university press, 2003. 494 p.
109. Онуфриенко А. В., Аникин Е. С., Зубарев А. В., Щепетков В. А. Дополнительная составляющая осевого усилия патрубка с резинокордной оболочкой // Динамика систем, механизмов и машин, 2014, № 1. С. 131-135.
110. Фудзии Т, Дзако Д. Механика разрушения композиционных материалов. Пер. с японск. С.Л. Масленникова. М.: Мир, 1982, 232 с.
111. Zvonov A.O., Kilunin I.Yu., Kondyurin A.Yu. Relevance of visualization in the field of reinforced rubber products non-destructive testing // Материалы международной научно-практической конференции «Инфографика и информационный дизайн: визуализация данных в науке», Омск: ОмГТУ, 2017. С. 122-127.
112. Entwistle K. The behaviour of braided hydraulic hose reinforced with steel wires // Int. Journal of Mech. Sci. 1981. Vol. 23, no. 4. pp. 229–241. DOI: 10.1016/0020-7403(81) 90048-5.

113. Волошин А. А., Григорьев Г. Т. Расчёт и конструирование фланцевых соединений. Л: Машиностроение, 1979. 130 с.

114. ГОСТ 34233.4-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. М.: Стандартиформ, 2019. 46 стр.

115. Биргер И.А. Резьбовые и фланцевые соединения. М: Машиностроение, 1990. 365 с.

116. ГОСТ 33259-2015. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на номинальное давление до PN 250. Конструкция, размеры и общие технические требования. М.: Стандартиформ, 2019. 102 стр.

117. Зубарев А.В., Климентьев Е.В., Звонов А.О. Некоторые актуальные проблемы расчетов пневматических упругих элементов машин // Материалы XXIV Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности», Омск: ОмГТУ, 2015. С. 52-56.

118. Аникин Е.С., Звонов А.О., Янишевская А.Г. Математическое обеспечение САПР конструкции гибких армированных рукавов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, № 65, 2018. С. 124-129.

119. Острейковский, В.А. Теория надежности: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Высш. шк., 2008. 463 стр.

120. Климентьев Е.В., Звонов А.О., Бублик Д.Н. Испытания резиновых рукавов на устойчивость к абразивному износу // Материалы 5-й международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», Омск: ОмГТУ, 2015. С. 45.

121. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Математическая статистика: Учебник. М.: Либроком, 2014. 352 с.

122. Щепетков В.А., Аникин Е.С., Зубарев А.В., Звонов А.О. Углы наклона нити к меридиану на сборочном барабане и экваторе поверхности резинокордной оболочки // Омский научный вестник, № 4 (154), 2017. С. 17-20.

123. Фаттахов М. М., Ращепкин А. К., Алексеев А. В., Денисов О. Л., Юнусова А. И. Основы проектирования бестраншейных технологий восстановления трубопроводов // Нефтегазовое дело, Т. 5, № 1, 2007. С. 95-98.

124. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Том 1. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.

125. Vlado A. Lubarda The mechanics of belt friction revisited // International Journal of Mechanical Engineering Education, Vol. 42, no. 2, 2014. pp. 97-112.

126. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б. Расчёт на прочность деталей машин. М: Машиностроение. 1993. 640 с.

127. Цысс В. Г., Зубарев А. В., Погорелый Б. Ф. Амортизирующие конструкции на основе резинокордных оболочек. Омск: Амфора, 2011. 344 с.

128. ГОСТ 1050-2013. Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 36 стр.

129. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учеб. для вузов – 10-е изд. . М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.

130. РД 10-249—98 Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. Серия 20. Выпуск 4. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. 344 с.

131. Василевич Ю. В., Горелый К. А., Сахоненко С. В., Иванов С. Н. Влияние химической усадки связующего в процессе отверждения на образование остаточных напряжений в цилиндрических оболочках из композита // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. Вып. 31, 2016. С. 67-72.

132. Shepetkov V.A., Yanishevskaya A.G., Zvonov A.O. Analytical study of the cord path character in rubber-cord flexible elements // Journal of Physics: Conf. Series. – Vol. 858. – 2017. – p. 1-4.

133. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2012. 260 с.

134. Дивеев А. И., Константинов С. В. Эволюционные алгоритмы для решения задачи оптимального управления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования, Т. 18, № 2, 2017. С. 254-265.

135. Звонов А.О., Янишевская А.Г. Модификация алгоритма дифференциальной эволюции и исследование её эффективности // Современные проблемы телекоммуникаций. Материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск: СибГУТИ, 2017. С. 415-420.

136. Csendes T., Pál L., Sendín J.-O. H., Banga J.R. The GLOBAL optimization method revisited // Optimization Letters, Vol. 2, No. 4, 2008. pp. 445–454. DOI: 10.1007/s11590-007-0072-3.

137. Pintér J.D. Global Optimization in Action: Continuous and Lipschitz Optimization. Algorithms, Implementations and Applications. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. 480 P.

138. Грошев С. В., Карпенко А. П. Мета-оптимизация популяционных алгоритмов многоцелевой оптимизации // Вестник евразийской науки. Vol. 8, No. 6. 2016. С. 1-11.

139. Звонов А.О., Янишевская А.Г. Влияние параметров алгоритма дифференциальной эволюции и его модификации на процесс оптимизации // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность», № 2, 2017. С. 62-65.

140. Смирнов С.А., Тарасов А.С. Автоматическая облачная система подстройки параметров алгоритмов // Компьютерные исследования и моделирование, Т. 7, № 3, 2015. С. 587-592.

141. Ugolotti R., Mesejo P., Nashed Y., Cagnoni S. GPU-Based Automatic Configuration of Differential Evolution: A Case Study // 16th Portuguese Conference on Artificial Intelligence, 2013. pp. 114–125. DOI:10.1007/978-3-642-40669-0_11.

142. Malhotra R., Singh N., Singh Y. Genetic algorithms: Concepts, design for optimization of process controllers // Computer and information science, Vol. 4, No. 2, 2011. pp. 39–54. DOI: 10.5539/cis.v4n2p39.

143. Звонов А.О. Использование генетических алгоритмов с рецессивными генами для оптимизации сложных технических объектов // Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях», 2017. С. 165-166.

144. Ansótegui C., Sellmann M., Tierney K. A gender-based genetic algorithm for the automatic configuration of algorithms // 15th International Conference "Principles and Practice of Constraint Programming", 2009. pp. 142–157. DOI: 10.1007/978-3-642-04244-7_14.

145. Бочаров И. Н., Фельдбаум А. А. Автоматический оптимизатор для поиска минимального из нескольких минимумов (глобальный оптимизатор) // Автоматика и телемеханика, № 23 (3), 1962. С. 289–301.

146. Momin J., Yang X. S. A literature survey of benchmark functions for global optimization problems // Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, Vol. 4, No. 2. 2013. pp. 150–194.

147. Beiranvand V., Hare W., Lucet Y. Best practices for comparing optimization algorithms // Optimization and Engineering, Vol. 18, No. 4, 2017. pp. 815-848.

148. Belkhir N., Dreo J., Savéant P., Schoenauer M. Feature based algorithm configuration: A case study with differential evolution // International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 2016. pp. 156-166. DOI:10.1007/978-3-319-45823-6_15.

149. Cavazzuti M. Design of experiments // Optimization methods. Berlin: Springer, 2013. pp. 13-42. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-642-31187-1_2.

150. Фуфаев Д.Э., Фуфаев Э.В. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем. СПб: Academia, 2018. 304 с.

151. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р. и др. Приемы объектно-ориентированного программирования. Паттерны проектирования. Пер. с англ. С-Пб.: Питер, 2004. 366 с.

152. Мартин Ф. Архитектура корпоративных программных приложений.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 544 с.

153. Мальгавко Д.С., Кошман М.А., Баранов Д.Е., Давыденко В.А., Янишевская А.Г., Соседко В.В., Василевский В.Б. Программа сравнения двух чертежей, разработанных в САПР «Компас» // Свидетельство регистрации электронного ресурса №17879. М.ИНИПИ РАО, 2012.
154. Дейт К. Введение в системы баз данных. С-Пб: Вильямс, 2018. 202 с.
155. Остроух А.В., Суркова Н.Е. Проектирование информационных систем. С-Пб: Лань, 2019, 164 с.
156. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 334 с.
157. Малюх В. Н. Введение в современные САПР: Курс лекций. М.: ДМК Пресс, 2010. 192 с.
158. Кунву Л. Основы САПР. С-Пб.: Питер, 2004. 640 с.
159. Звонов А.О. Современная парадигма эволюционного программирования // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность, № 2, 2013. С. 34-36.
160. ГОСТ 34.003-90 Автоматизированные системы. Термины и определения. Информационная технология. М.: Стандартиформ, 2009. 15 С.
161. Richards M., Ford N. Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach // Massachusetts: O'Reilly Media, 2020. 432 p.
162. Прайс М. Дж. С#7 и .NET Core. Кроссплатформенная разработка для профессионалов. С-Пб.: Питер, 2018. 640 с.
163. Лафоре Р. Объектно-ориентированное программирование в С++. 4-е изд. СПб, Питер, 2018. 928 с.
164. Иванов В. Б. Прикладное программирование на С/С++. С нуля до мультимедийных и сетевых приложений. М.: Солон-Пресс, 2019. 240 с.
165. Zubarev A.V., Anikin E.S., Zvonov A.O. Top-down reinforced rubber cushions design: Levels, mathematical models, practice difficulties // International Conference MEACS – 2015. Proceedings of the International Conference. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2015. p. 1-4.

Приложение А

Акт о внедрении на ФГУП «ФНПЦ «Прогресс»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР



«Прогресс»
(ФГУП «ФНПЦ «Прогресс»)



5-я Кордная ул., д. 4, г. Омск, 644018, тел./факс (3812) 56-14-72, info@progress-omsk.ru, www.progress-omsk.ru,
Р/сч. 40502810245370100093 в Омском отделении № 8634 ПАО СБЕРБАНК, г. Омск,
БИК 045209673, ИНН 5506010517, КПП 550601001, ОГРН 1025501249883

« 30 » июля 2020 г.
№ 16



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
«ФГУП «ФНПЦ «Прогресс»

А.В. Зубарев
А.В. Зубарев
« 30 » июля 2020 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Звонова Александра Олеговича

Комиссия в составе:

Председатель	Первый зам. генерального директора – директор института	Бобров Сергей Петрович
Члены комиссии	И.о. заведующего отделом № 2	Баранов Виктор Александрович
	Главный конструктор комплекса № 1	Комаров Юрий Петрович
	Заведующий лабораторией № 212	Баженов Алексей Михайлович

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Алгоритм автоматизации проектирования типорядов изделий на примере резинокордных патрубков», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в практической деятельности ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» при разработке напорно-всасывающих армированных рукавов в виде компьютерной программы для автоматического проектирования типорядов патрубков на основе модели-прототипа.

Использование указанного результата позволило значительно повысить скорость и качество проектирования резинокордных патрубков на предприятии.

Председатель комиссии

Члены комиссии

С.П. Бобров
С.П. Бобров

В.А. Баранов
В.А. Баранов

Ю.П. Комаров
Ю.П. Комаров

А.М. Баженов
А.М. Баженов

29.07.2020г.
29.07.2020г.

Приложение Б

Акт о внедрении в учебный процесс ОмГТУ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «Омский
государственный технический
университет»

д.т.н., профессор

Мышлявцев А. В.

06 2017 г.



АКТ

о внедрении в учебный процесс
результатов научно-исследовательской работы

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы Звонова А.О. применены при проведении научно-производственной практики, научно-исследовательской работы студентов, лабораторных работ по дисциплинам "Анализ и обработка данных", "Разработка САПР", "Планирование экспериментов и обработка данных", при обучении студентов по направлению "Информатика и вычислительная техника" на факультете элитного образования и магистратуры в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет» в течение 2015-2017 г.г. Автором разработано описание процесса проектирования современных изделий машиностроения на основе концептуальных математических моделей, которое применялось в процессе обучения.

Предлагаемое автором описание процесса проектирования позволяет повысить образовательный и научный уровень студентов в области информатики и вычислительной техники.

Декан факультета элитного
образования и магистратуры

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "Титенко В.В.", written over a horizontal line.

Титенко В. В.

06 2017 г.

Заведующий кафедрой
"Инженерная геометрия и САПР",
к.п.н., доцент

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "Кайгородцева Н.В.", written over a horizontal line.

Кайгородцева Н.В.

06 2017 г.