

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Звонов Александр Олегович

Методика, математическое и программное обеспечение
автоматизированного проектирования типорядов резинокордовых
патрубков

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена на кафедре «Инженерная геометрия и САПР»
ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент, **Янишевская Анна Генриховна**

Официальные оппоненты:

Гаврилин Алексей Николаевич – доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет», профессор отделения машиностроения;

Корчагин Павел Александрович – доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный
университет», г. Омск, проректор по научной работе и цифровой
трансформации;

Огородникова Ольга Михайловна – доктор технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры
электронного машиностроения

Защита состоится «26» сентября 2023 г. в 14:00 на заседании
диссертационного совета УрФУ 2.3.11.30 по адресу: 620002,
г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4826>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Уколов Станислав Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из основных задач в автоматизации проектирования является задача синтеза объектов, часто решаемая как задача параметрической оптимизации. Методы оптимизации с успехом применяются на практике, таковы методы градиентного спуска, генетической оптимизации, динамического программирования. Существенный вклад в развитие аналитических методов сделан Е. Ю. Нестеровым, А. С. Немировским, Rie J. Развитием численных методов, в том числе выбором их оптимальных параметров, в настоящее время успешно занимается международная группа учёных *COSEAL (Configuration and selection of algorithms)* при активном участии таких специалистов как М. Lindauer, А. Tornede. Из российских авторов можно отметить А.И. Дивеева, А.П. Карпенко, Е.С. Семёнкина, Ю.А. Скобцова.

Однако получение оптимальной конструкции почти всегда является только одним из этапов создания нового изделия. Экономически более выгодно разрабатывать сразу типоряд изделий, которые в зависимости от своих размеров могут выполнять ряд задач последовательно возрастающего объема или сложности. Можно указать большое количество примеров таких типорядов – от стандартизированного крепежа по ГОСТ или DIN до типорядов нефтяных резервуаров или подъемных кранов. Экономичность такого подхода обусловлена единообразием техпроцессов изготовления изделий типоряда, частичной взаимозаменяемостью деталей изделий типоряда и т.д.

Указанные выше методы оптимизации оказываются менее эффективными при решении задачи оптимизации изделий типоряда. Изменение одного или двух параметров (к примеру, длины и внутреннего диаметра основного элемента конструкции) требует запуска процесса оптимизации «с нуля». Это, в свою очередь, требует инициализации модели, а также не гарантирует сохранения как можно большего числа технических решений, принятых в первоначальной конструкции. Экономический эффект от внедрения такого типоряда снижается.

К изделиям, типоряды которых активно обновляются и совершенствуются в настоящее время, относятся армированные кордом напорные патрубки средних и высоких давлений. Современные резинокордовые патрубки (РКП) представляют собой сложные композиционные конструкции, подкрепленные закладной арматурой. Типичный типоряд РКП представляет собой патрубки на стандартные диаметры условного прохода трубопроводов (Ду) от 32 до 300 мм, имеющие общую конструкцию (схему армирования, конструкцию бортовой заделки) и присоединительные размеры по одному стандарту (к примеру, ГОСТ 12815-80). основополагающими работами в области

проектирования РКП являются труды В.Л. Бидермана, Б.Л. Бухина, А.М. Мухина, И.А. Трибельского. Активное совершенствование РКП связано с внедрением новых полимерных материалов (силикона, полиуретана, высокопрочных арамидных волокон). Однако проектирование РКП проводят по методикам, которые подразумевают использование программных средств, слабо взаимодействующих между собой. Процесс проектирования нового типоряда РКП занимает не менее шести месяцев с момента получения ТЗ до оформления конструкторской и технологической документации (КД и ТД) для изготовления прототипа.

Таким образом, проектирование РКП является одной из областей, для которых актуальна проблема автоматизации проектирования типорядов изделий. В рамках системного подхода, данная проблема может быть решена разработкой соответствующих методики и алгоритма проектирования.

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

Объектом исследования является процесс инженерного расчета типорядов армированных рукавов.

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

Поставленные **задачи** исследования:

- разработать методику автоматизации проектирования резинокордовых патрубков, включающую современные подходы к решению задач проектирования;
- разработать математическое обеспечение автоматизированного проектирования резинокордовых патрубков с учетом типовых конструкций и технологий;
- разработать алгоритм численной минимизации последовательности целевых функций в едином пространстве параметров;
- реализовать разработанную методику проектирования и алгоритм оптимизации типоряда изделий в виде подсистемы автоматизированного расчета типорядов резинокордовых патрубков;
- провести апробацию разработанной методики и подсистемы.

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 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. В рамках исследования получены следующие основные результаты, обладающие научной новизной:

1. Разработана новая методика автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков, включающая методы оптимизации и экспертных оценок.

2. Разработаны новые математические модели шести конструкций РКП, описывающие патрубок на системном, конструктивном, технологическом и материальном уровнях, и определенные на едином пространстве параметров.

3. Разработана модификация алгоритма численной оптимизации, основанный на алгоритме дифференциальной эволюции, позволяющая последовательно оптимизировать несколько конструкций резинокордовых патрубков без генерации новых начальных популяций.

Соответствие паспорту специальности.

1. Заявленный результат по п. 1 соответствует 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. Заявленный результат по п. 2 соответствует п. 6 паспорта специальности: «Разработка компьютерных моделей, алгоритмов, программных комплексов оптимального проектирования технических изделий и процессов».

3. Заявленный результат по п. 3 соответствует 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 автоматизированного расчета типорядов резинокордовых патрубков, выходные данные которой могут быть связаны с параметризованным чертежом изделия.

2. Разработанный алгоритм позволяет решать ряд последовательных задач оптимизации без возврата к начальному состоянию популяции, что обеспечивает сохранение части параметров конструкции при переходе к проектированию нового изделия типоряда при экономии временных и вычислительных ресурсов.

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».

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 программного обеспечения, в котором 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. Разработанное программное обеспечение успешно применено на ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» при проработке заказа на серию РКП. Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика автоматизированного проектирования типорядов изделий.
2. Алгоритм численной оптимизации типорядов изделий.
3. Математические модели шести конструкций резинокордовых патрубков на системном, конструктивном и материальном уровнях проектирования.
4. Подсистема автоматизированного расчета типорядов резинокордовых патрубков
5. Результаты апробации разработанного программного обеспечения.

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: серье, материалы, технологии» (Москва, 2017); XXIII научно-практической конференции «Резиновая промышленность: серье, материалы, технологии» (Москва, 2018).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 32 научных работах, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 3 работы – в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science; 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 работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, и заключения. Списки используемой литературы приведены в конце диссертации с разделением по главам и включают суммарно 165 источников. Общий объем диссертации составляет 138 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 40 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы объект и предмет исследования, методы и средства исследования, научная и практическая значимость работы, кратко изложено содержание последующих глав.

В первой главе рассмотрено современное состояние исследований в выбранной области.

По вопросу проектирования типорядов изделий рассмотрена в том числе нормативная база по унификации изделий - РД 50-632-87 и ГОСТ 23945.0-80.

Типичная методика автоматизированного проектирования РКП на предприятиях является итерационным процессом, включающим геометрическое моделирование и конечноэлементный анализ конкретной конструкции в САПР общего назначения. Основными недостатками такого подхода являются значительная трудоёмкость, слабая связь между уровнями проектирования, недостаточная эффективность САПР общего назначения при решении специфических задач.

Сделан вывод о том, что для эффективного внедрения современных проектных процедур необходима разработка соответствующего методологического обеспечения.

Во второй главе рассматриваются методологические основы применения в САПР типорядов РКП современных высокоэффективных проектных процедур, в том числе вычислительных методов и средств работы со знаниями. В качестве первого шага проектирование определено как процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание. Описания объекта при этом проходят через ряд уровней абстракции. Каждому уровню абстракции поставлена в соответствие концептуальная математическая модель вида $K = [P_1, P_2, \dots, P_n, S_1, S_2, \dots, S_k]$, где P_n – параметры модели, S_k – соотношения между параметрами. Полученная модель позволила представить процесс проектирования изделия в виде схемы, показанной на рисунке 2.



Рис. 2. Использование инженерии знаний в существующей инженерной практике

На основе имеющегося алгоритма проектирования одного изделия сформулирована методика проектирования типоряда изделий, состоящая из следующих шагов:

1. Ввод исходных данных технического задания на каждое изделие типоряда.

2. Выбор параметров, по которым изделия типоряда имеют отличия.
3. Выбор одного из параметров по п. 2, определение его диапазона в типоряду, определение изделия типоряда с минимальным значением данного параметра.
4. Ввод начальных значений параметров имеющейся математической модели изделия по п. 3 по его аналогам, либо по результатам минимально необходимого эскизного проектирования. Фиксация всех параметров изделия кроме параметров конструкции.
5. Автоматическая численная минимизация либо максимизация значения принятой в методике целевой функции для изделий типоряда. Целевая функция включает параметры типоряда, относящиеся к рассматриваемому изделию.
6. Экспертная оценка полученного результата. По результатам оценки либо изменяются исходные параметры и повторяется шаг 5, либо фиксируются значения параметров конструктивного уровня и расширяется диапазон допустимых значений технологических параметров.
7. Автоматическая численная минимизация либо максимизация значения принятой в методике целевой функции для изделий типоряда.
8. Экспертная оценка полученного результата. По результатам оценки либо изменяются исходные параметры и повторяется шаг 7, либо фиксируются значения параметров технологического уровня и расширяется диапазон допустимых значений материальных параметров.
9. Автоматическая численная минимизация либо максимизация значения принятой в методике целевой функции для изделий типоряда.
10. Экспертная оценка полученного результата. По результатам оценки либо изменяются исходные параметры и повторяется шаг 9, либо фиксируются значения параметров материального уровня и полученные параметры конструкции вносятся в базу данных на изделия типоряда.
11. Выбирается изделие типоряда, следующее за изделием по п. 3 по возрастанию выбранного параметра.
12. Для изделия по п. 11 повторяются шаги 5-10.
13. Шаги 11-12 повторяются пока для всех изделий типоряда не будут определены параметры их математических моделей.

В третьей главе выделено шесть типовых конструкций РКП, для которых сформулированы математические модели, включающие параметры системного, конструктивного и технологического уровней. Материальный уровень представлен в модели в виде базы материалов и отнесен к информационному обеспечению САПР. Данные математические модели являются упрощением общих расчетных соотношений механики тонких армированных оболочек произвольной формы. Рассмотрены как параметры, общие для всех конструкций, так и специализированные. К общим параметрам относятся параметры расчетной схемы, приведенной на рисунке 4.

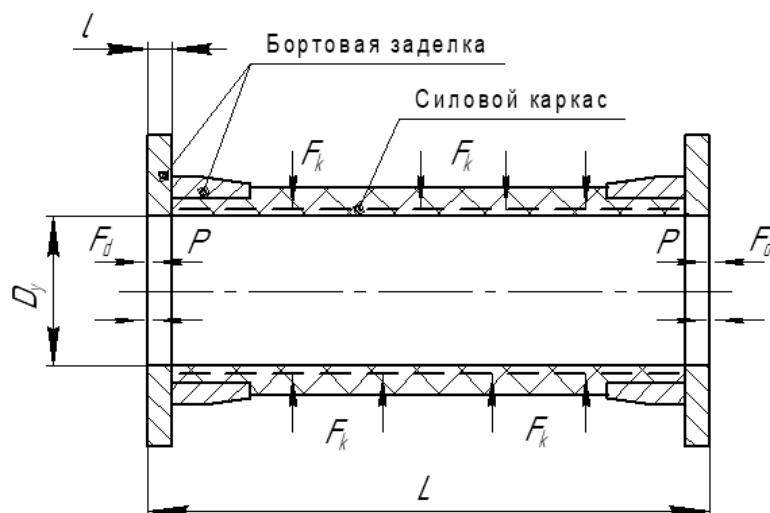


Рис. 4. Расчётная схема РКП

Как видно из рисунка, нагрузка от внутреннего давления P распределяется на силовой каркас и бортовую заделку. 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. Соответствующие выражения для основных действующих в конструкции нагрузок:

$$F_d = P \frac{\pi D_y^2}{4} , \quad (1)$$

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

Расчетные толщины конструктивных элементов, воспринимающих данные нагрузки, зависят от типа конструкции.

Для улучшения сходимости процесса оптимизации модели, определены таблицы ограничений параметров математической модели. Сформулировано шесть допущений, в рамках которых полученные математические модели сохраняют адекватность. Для обработки математических моделей с помощью численных методов, все параметры объединены в едином пространстве параметров. Таким образом, переход между различными конструктивными решениями состоит в занулении части параметров, и в готовом решении часть параметров конструктивного уровня также равняется нулю. Приведен пример конструкции и соответствующего ей набора параметров. Кроме того, сформулирована целевая функция минимизации – поскольку такие параметры как надёжность ограничены допустимыми минимальными значениями, в качестве целевой функции сформулирована функция материалоемкости:

$$S_{C \min} = 2(l + l_1 + d) + i \cdot N_{\text{разр}} \frac{L}{50}. \quad (3)$$

В четвертой главе предложена модификация одного из методов численной оптимизации, известного как алгоритм дифференциальной эволюции. Целью модификации алгоритма является обеспечение максимального использования полученных оптимальных параметров модели при поиске нового экстремума целевой функции. Данная цель подразумевает устранение одного из основных недостатков численных методов оптимизации - по мере приближения к точке минимума все генотипы также собираются в расположенном вокруг неё «овраге». Попав в точку локального минимума, алгоритм за счет сокращения «генетического разнообразия» может утратить возможность покинуть локальный минимум. Блок-схема модифицированного алгоритма приведена на рисунке 4.

Предложенная модификация алгоритма заключается во введении в генотип каждой особи блока рецессивных генов, которые могут мутировать независимо от приближения особи к целевой функции, что обеспечивает постоянное генетическое разнообразие популяции.

В качестве исходных данных для сравнительного тестирования алгоритмов взяты многоэкстремальные функции, построенные по методу Фельбаума. В процессе тестирования каждая оценка эффективности генетического алгоритма проводилась путём вычисления среднего значения целевой функции после 500 тестов. Успешным считалось решение, имеющее отклонение от известных решений целевой функции в десять процентов или менее. Исследована зависимость точности алгоритмов от следующих параметров: разброс локальных минимумов, точность совпадения значений ЦФ для двух последовательных итераций, вероятность мутации, специфический параметр алгоритма F , число особей в популяции.

Для сравнения эффективности алгоритмов предложен параметр Q_3 , характеризующий сходство двух функций с одинаковым числом локальных минимумов n :

$$Q_3 = \left(\frac{\sum_n |m_1 - m_2|}{n} / \frac{\sum_n m_1}{n} \right) \times 100 = \frac{\sum_n |m_1 - m_2|}{\sum_n m_1} \times 100, \quad (4)$$

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 экстремальной точки.

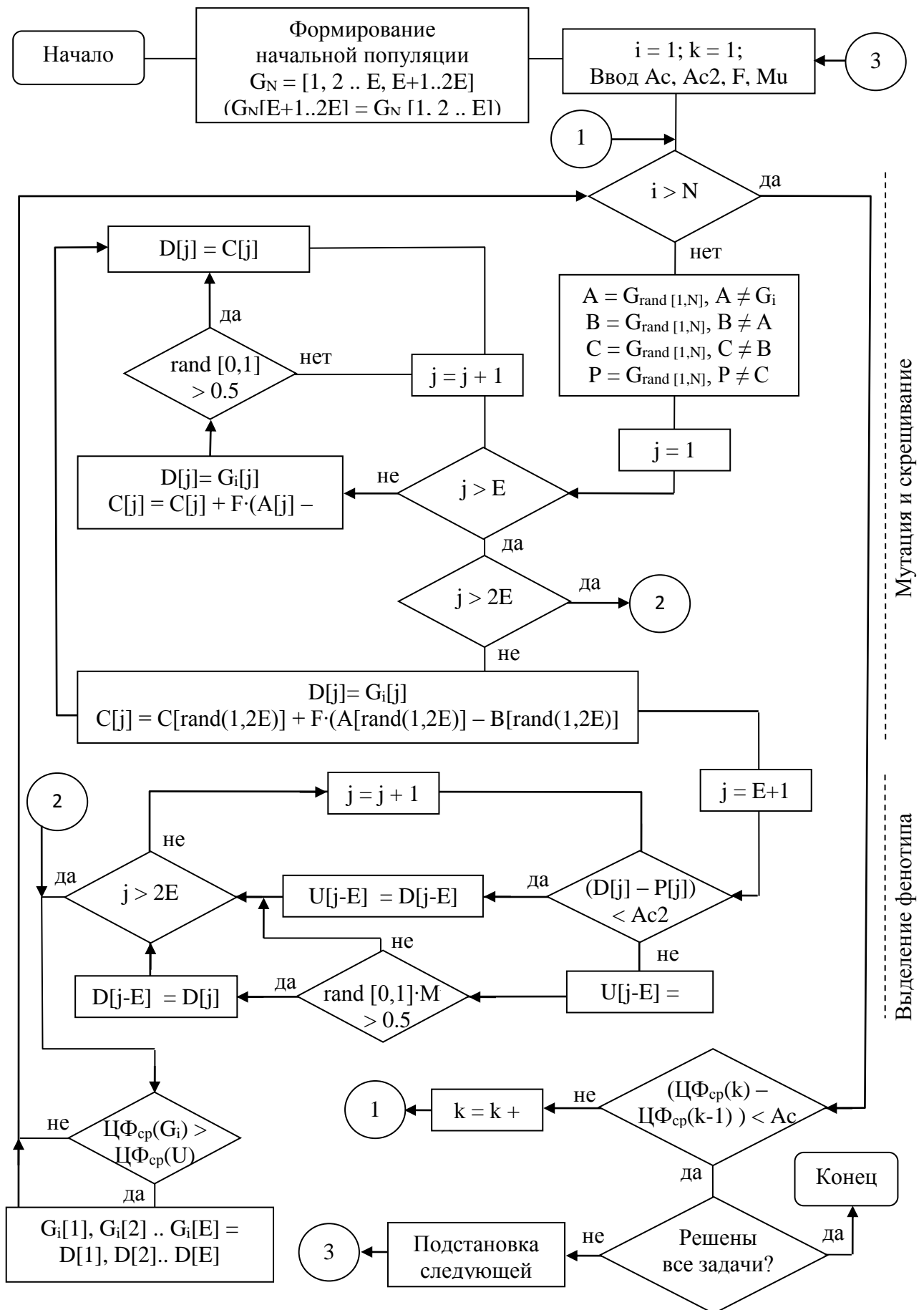


Рис. 4. Блок-схема модифицированного алгоритма

Результаты одного из вычислительных экспериментов приведены в таблице 1. Данные таблицы показывают, что процент успешных решений новой задачи составляет не ниже 73, при этом для новых задач со значениями параметра Q_3 от 0 до 70 процентов успешное решение находится быстрее, чем для исходной задачи. Сравнение данных таблицы 1 с результатами тестирования немодифицированного алгоритма показало, что модифицированный алгоритм более эффективен при решении задач с параметром Q_3 от 0 до 50 процентов. При использовании математических моделей РКП, полученных в главе 3, это означает, что при проектировании изделий типоряда могут меняться от трёх до пяти исходных параметров из имеющихся десяти. Процент успешных решений может быть повышен за счет изменения настраиваемых параметров оригинального алгоритма, не подвергавшихся модификации.

Таблица 1. 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

В пятой главе описана разработка информационного обеспечения САПР РКП в виде текстовых файлов, обрабатываемых программой, написанной на языке программирования высокого уровня. Приведены примеры заполнения данных файлов.

Разработанный алгоритм автоматизации проектирования типорядов изделий представлен на рисунке 5. Алгоритм реализован в виде программы, написанной на языке C++.

Популяция решений с текущими параметрами хранится в матрице вещественных чисел `float GB [count_cells][count_genes]`.

Шаг оптимизации реализован в виде функции `cycle`, применяющей оператор мутации `CELL_mute` ко всем экземплярам популяции. Кроме того, оператор (функция) `CELL_mute` возвращает достигнутое новым экземпляром значение целевой функции, на основе которого функция `cycle` подсчитывает общее минимальное значение ЦФ за цикл.

Благодаря такой реализации, одна функция `cycle` может использоваться как в процедурах автоматического тестирования алгоритма, управляемых возвращаемым значением, так и процедурах оптимизации реального изделия, выводящих в консоль промежуточные результаты и запрашивающих пользователя о дальнейших действиях.

Вспомогательными функциями являются такие функции как заполнение популяции начальными значениями (`GB_fill`), подсчет значения целевой функции для списка параметров (`CF`), корректировка целевой функции (`new_CF`), чтение/запись значений в базу данных.

Пробная эксплуатация программы проводилась на ФГУП «ФНПЦ «Прогресс» при проработке заказа на серию РКП с рабочим давлением 30 кг/см². Получен акт о внедрении результатов диссертационной работы № 16 от 30.07.2020 г.

Использование рецессивных генов повысило преимущество технических решений в изделиях типоряда: по сравнению с повторными запусками немодифицированного алгоритма, полученные технические решения гарантированно используют часть найденных ранее параметров конструкции.

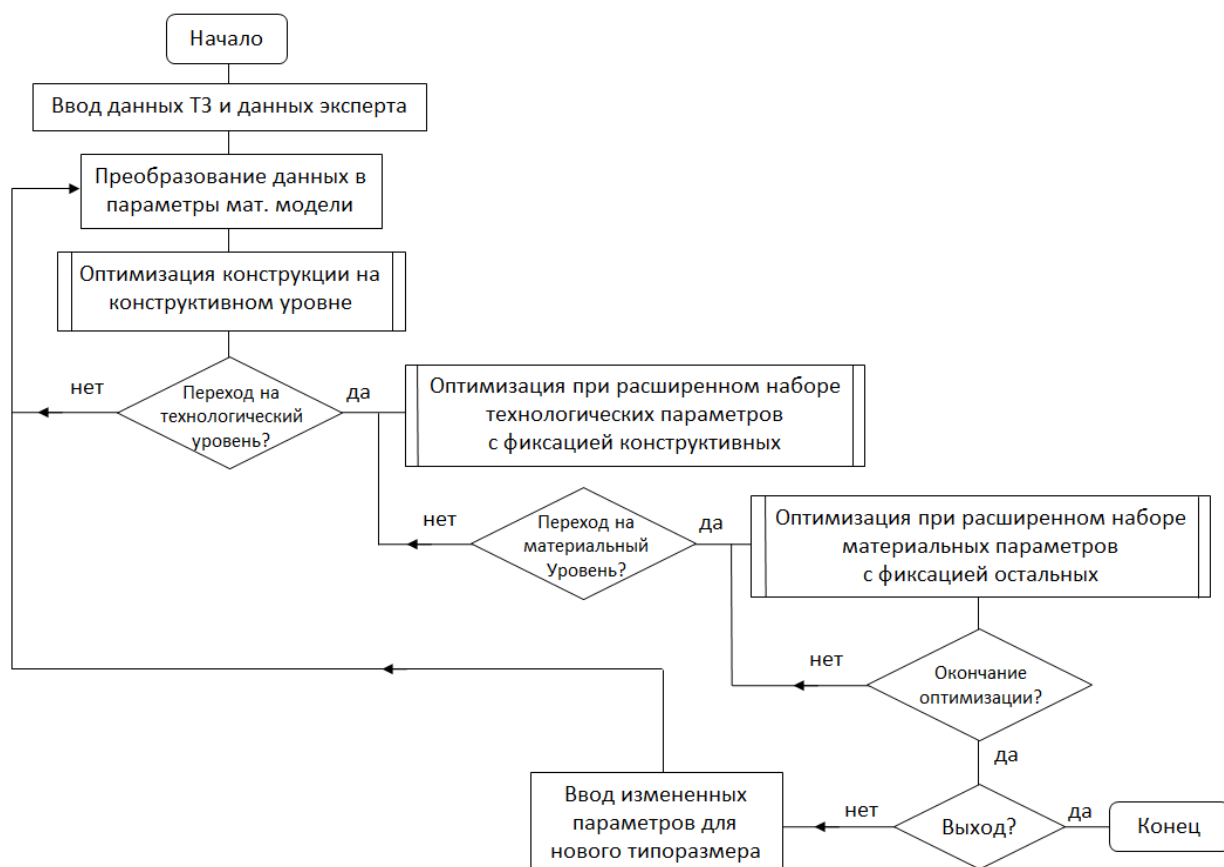


Рис. 5. Алгоритм автоматизации проектирования типорядов изделий

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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 программная реализация предложенных методик и алгоритмов в виде подсистемы автоматизированного расчета типорядов резинокордовых патрубков.

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

1. Разработана методика автоматизации проектирования типорядов резинокордовых патрубков, которая отличается включением в неё методов искусственного интеллекта 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.

2. Разработаны математические модели шести конструкций РКП, которые отличаются совместным использованием системных, конструктивных и материальных параметров конструкции. Полученные математические модели определяют оптимальные 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 РКП.

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

4. Предложенная методика и алгоритм оптимизации дополнены информационным и программным обеспечением на языке программирования высокого уровня, в результате получена подсистема инженерных расчетов 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. Результаты проведенных исследований включены в электронное учебное пособие «Системы автоматизации проектирования в машиностроении», что подтверждается актом, приведенным в приложении Б.

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 такое решение означает отсутствие автоматизации, 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 функциональность систем автоматизированного проектирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Shepetkov V. Analytical study of the cord path character in rubber-cord flexible elements / V. Shepetkov, A. Yanishevskaya, A. Zvonov // Journal

of Physics: Conf. Series. – Vol. 858 (1). – 2017. – pp. 012030. (0,25 п.л. / 0,16 п.л.) (Scopus)

2. Zubarev A. V. Top-down reinforced rubber cushions design: Levels, mathematical models, practice difficulties / A. V. Zubarev, E. S. Anikin, **A. O. Zvonov** // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) – 2015. – pp. 1-4. (0.25 п.л. / 0.16 п.л.) (Scopus)

3. Klimentyev E. V. Rubber-cord cushions application in modern engineering / E. V. Klimentyev, **A. O. Zvonov**, E. U. Glazkova // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics) – 2014. – pp. 1-5. (0.31 п.л. / 0.2 п.л.) (Scopus, WoS)

4. **Звонов А. О.** Расчёт процессов объемного сжатия композиционных материалов с полимерной матрицей в современных CAE-системах / **А. О. Звонов**, А. Г. Янишевская // Автоматизация и современные технологии. – №. 7. – 2014. – С. 24-26. (0,2 п.л. / 0,16 п.л.)

5. **Звонов А. О.** Методы искусственного интеллекта в задачах автоматизации принятия проектных решений / **А. О. Звонов**, А. Г. Янишевская // Автоматизация и современные технологии. – №. 10. – 2013. – С. 18-21. (0,25 п.л. / 0,21 п.л.)

6. **Звонов А. О.** Математическая модель информационно-измерительного комплекса на промышленном предприятии / **А. О. Звонов**, А. Г. Янишевская // Автоматизация и современные технологии. – №. 4. – 2012. – С. 16-20. (0,31 п.л. / 0,21 п.л.)

Патенты на изобретения:

7. Патент № 2639468 Российская Федерация, МПК F16L 33/22 (2006.01). Устройство крепления арматуры гибкого рукава : № 2016138903 : заявл. 03.10.2016 : опубл. 21.12.2017 / Аникин Е.С., Баженов А.М., Зубарев А.В., Осипов А.В., Корунов Д.А., **Звонов А.О.** ; заявитель ФГУП «ФНПЦ «Прогресс». – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный. (0,43 п.л. / 0,16 п.л.)

8. Патент № 2636976 Российская Федерация, МПК F16L 11/00 (2006.01). Резинокордный элемент : № 2016119921 : заявл. 23.05.2016 : опубл. 29.11.2017 / Аникин Е.С., Зубарев А.В., Климентьев Е.В., **Звонов А.О.** ; заявитель ФГУП «ФНПЦ «Прогресс». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный. (0,54 п.л. / 0,16 п.л.)

9. Патент № 2564732 Российская Федерация, МПК F16L 11/08 (2006.01). Резинокордный элемент : № 2014116316/06 : заявл. 22.04.2014 : опубл. 10.10.2015 / Аникин Е.С., Онуфриенко А.В., Щепетков В.А., Зубарев А.В., Климентьев Е.В., **Звонов А.О.** ; заявитель ФГУП «ФНПЦ «Прогресс». – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.)

10. Патент № 2534260 Российская Федерация, МПК F16L 33/22 (2006.01). Устройство крепления арматуры оболочек вращения : 2013146270/06 : заявл. 16.10.2013 : опубл. 27.11.2014 / Аникин Е.С.,

Зубарев А.В., **Звонов А.О.**, Климентьев Е.В., Онуфриенко А.В. ; заявитель ФГУП «ФНПЦ «Прогресс». – 5 с. : ил. – Текст : непосредственный. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.)

Другие публикации:

11. **Звонов А. О.** Аналитический расчет рабочего профиля опоры постоянного усилия // Инженерный вестник Дона. – №. 4. – 2023. – С. 1-9. (0.4 п.л. / 0.4 п.л.)

12. **Звонов А. О.** Построение аналитической модели профиля манжетного уплотнения / **А. О. Звонов**, А. Г. Янишевская // Программные системы и вычислительные методы. – №. 3. – 2020. – С. 10-18. (0.32 п.л. / 0.27 п.л.)

13. Вакулов Н. В. Повышение точности прогнозирования характеристик резин при старении / Н. В. Вакулов, А. В. Мышлявцев, **А. О. Звонов**, В. И. Малютин // Сборник трудов XXIII научно-практической конференции «Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии». – М.: НИИШП, 2018. – С. 52-56. (0.16 п.л. / 0.05 п.л.)

14. Вакулов Н. В. Использование расчетных программ для прогнозирования срока службы резин и резинотехнических изделий / Н. В. Вакулов, А. В. Мышлявцев, В. И. Малютин, **А. О. Звонов** // Каучук и резина. – № 1 (77). – 2018. – С. 52-57. (0.37 п.л. / 0.16 п.л.)

15. Аникин Е. С. Математическое обеспечение САПР конструкции гибких армированных рукавов / Е. С. Аникин, **А.О. Звонов**, А. Г. Янишевская // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – № 65. – 2018. – С. 124-129. (0.37 п.л. / 0.27 п.л.)

16. Вакулов Н. В. Прогнозирование срока службы резин и резинотехнических изделий при помощи расчетных программ в системе MATLAB / Н. В. Вакулов, А. В. Мышлявцев, В. И. Малютин, **А. О. Звонов** // Сборник докладов XXII научно-практической конференции «Резиновая промышленность: сырье, материалы, технологии». – М.: НИИШП, 2017. – С. 169-172. (0.16 п.л. / 0.06 п.л.)

17. **Звонов А. О.** Влияние параметров алгоритма дифференциальной эволюции и его модификации на процесс оптимизации / А. О. Звонов, А. Г. Янишевская // Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность». – Омск: ОмГТУ – 2017. С. 62-65. (0.16 п.л. / 0.1 п.л.)

18. Щепетков В. А. Углы наклона нити к меридиану на сборочном барабане и экваторе поверхности резинокордной оболочки / В. А. Щепетков, Е. С. Аникин, А. В. Зубарев, **А. О. Звонов** // Омский научный вестник. – № 4 (154). – 2017. – С. 17-20. (0.27 п.л. / 0.16 п.л.)

19. **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».* – Омск: ОмГТУ, 2017. – С. 165-166. (0.06 п.л. / 0.06 п.л.)

20. **Zvonov A. O.** Relevance of visualization in the field of reinforced rubber products non-destructive testing / A. O. Zvonov, I. Yu. Kilunin, A. Yu. Kondyurin // *Материалы международной научно-практической конференции «Инфографика и информационный дизайн: визуализация данных в науке».* – Омск: ОмГТУ, 2017. – С. 122-127. (0.21 п.л. / 0.16 п.л.)

21. **Звонов А.О.** Модификация алгоритма дифференциальной эволюции и исследование её эффективности / **А. О. Звонов**, А. Г. Янишевская // *Материалы Российской научно-технической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций».* – Новосибирск: СибГУТИ, 2017. – С. 415-420. (0.21 п.л. / 0.16 п.л.)

22. Зубарев А. В. Стенд для динамических испытаний пневмоэлемента с подключаемым дополнительным объемом / А. В. Зубарев, Е. В. Климентьев, **А. О. Звонов**, Д. Н. Бублик // *Материалы 26-го Международного симпозиума «Проблемы шин, РТИ и эластомерных композитов».* – М.: ВЕСКОМ, 2015. – С. 132-136. (0.31 п.л. / 0.25 п.л.)

23. Аникин Е. С. Проектирование пневматической системы виброизоляции грохота инерционного / Е. С. Аникин, **А. О. Звонов** // *Сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции «Защита от повышенного шума и вибрации».* – СПб: Айсинг, 2015. – С. 300-305. (0.16 п.л. / 0.06 п.л.)

24. Зубарев А. В. Некоторые актуальные проблемы расчетов пневматических упругих элементов машин / А. В. Зубарев, Е. В. Климентьев, **А. О. Звонов** // *Материалы XXIV Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности».* – Омск: ОмГТУ, 2015. – С. 52-56. (0.16 п.л. / 0.1 п.л.)

25. Климентьев Е. В. Испытания резиновых рукавов на устойчивость к абразивному износу / Е. В. Климентьев, **А. О. Звонов**, Д. Н. Бублик // *Материалы 5-й международной научно-технической конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства».* – Омск: ОмГТУ, 2015. – С. 45. (0.06 п.л. / 0.04 п.л.)

26. **Звонов А. О.** Проблема визуализации нейронной сети произвольной структуры // *Информационные технологии в науке и производстве. Материалы молодежной научно-технической конференции.* – Омск: ОмГТУ, 2014. – С. 8-12. (0.1 п.л. / 0.1 п.л.)

27. **Звонов А. О.** Использование резинокордных оболочек в современном машиностроении // *Динамика систем, механизмов и машин.* – № 2. – 2014. – С. 293-296. (0.25 п.л. / 0.25 п.л.)

28. **Звонов А. О.** Современная парадигма эволюционного программирования // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – Омск: ОмГТУ, 2013. – С. 34-36. (0.19 п.л. / 0.19 п.л.)

29. **Звонов А. О.** Задача анализа вариантов технических решений в системах автоматического проектирования // Сборник трудов конференции Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – Омск: ОмГТУ, 2013. С. 36-38. (0.19 п.л. / 0.19 п.л.)

30. **Звонов А. О.** Перспективы применения интеллектуальных САПР при проектировании многослойных оболочек // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии». – М.: МАТИ, 2012. – С. 244-245. (0.12 п.л. / 0.12 п.л.)

31. **Звонов А. О.** Разработка экспертной системы поддержки проектирования многослойных оболочек / А. О. Звонов, А. Г. Янишевская // Материалы Всероссийской молодежной конференции «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСиТ-2012)». – Кемерово: КузГТУ, 2012. – С. 99-100. (0.06 п.л. / 0.06 п.л.)

32. **Звонов А.О.** Современная терминология искусственного интеллекта в английском языке // Материалы I международной научно-практической конференции «Изучение терминологии как составляющая подготовки специалиста». – Омск: ОмГТУ, 2011. – С. 58. (0.06 п.л. / 0.06 п.л.)