

В рамках проведения Фестиваля науки в Тамбовской области

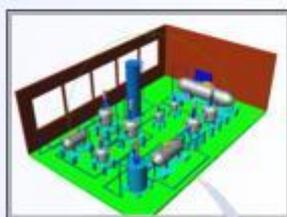
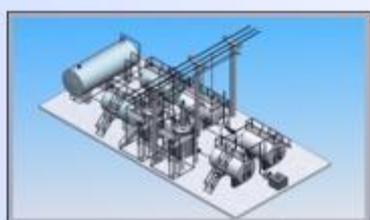


# ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Выпуск 11

## VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

Issue 11



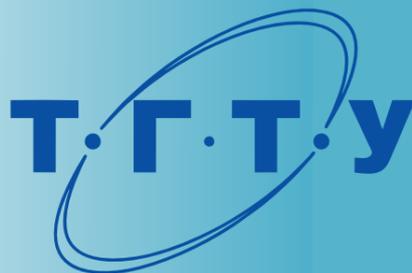
Тамбов

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»

2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Ассоциация инженерного образования России  
Администрация Тамбовской области  
Ассоциация «Объединенный университет имени В. И. Вернадского»  
Ассоциация «Цифровые инновации в машиностроении»  
Союз машиностроителей России  
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
технический университет»

В рамках проведения Фестиваля науки в Тамбовской области



Всероссийский  
Фестиваль  
науки

## ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН

Материалы XI Международной научно-практической конференции

г. Тамбов, 10 – 12 ноября 2025 г.

Выпуск 11

## VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING AND INDUSTRIAL DESIGN

Issue 11

*Научное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2025

УДК 658.512.2  
ББК Ж18я43  
В52

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор М. Н. Краснянский (общая редакция);  
д-р техн. наук, профессор В. А. Немтинов;  
д-р техн. наук, профессор В. Г. Мокрозуб;  
д-р техн. наук, профессор С. В. Карпушкин;  
канд. техн. наук С. В. Карпов

**В52** **Виртуальное моделирование**, прототипирование и промышленный дизайн [Электронный ресурс] : материалы XI Международной научно-практической конференции / под общ. ред. М. Н. Краснянского ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ».

ISBN 978-5-8265-1836-6.

Вып. 11. – 2025. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Mb ; необходимое место на HDD 11,0 Mb ; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2969-0.

Опубликованы материалы пленарных и секционных докладов Международной научно-практической конференции, которая посвящена проблемам научно-технического и социально-экономического развития регионов. Целью конференции является обсуждение и публикация научных достижений ученых, а также определение возможных путей решения проблем разработки методов и алгоритмов создания и применения виртуальных моделей и прототипов объектов различного назначения и сложности.

В настоящее время виртуальное моделирование и прототипирование технических систем широко используется при решении задач промышленного дизайна, проектирования, модернизации, перепрофилирования производств различных отраслей промышленности. Еще одна популярная сфера применения виртуального моделирования и прототипирования – создание моделей культурно-исторических объектов в целях сохранения первоначального облика памятников архитектуры, в том числе утраченных, мемориальных и культурных сооружений.

Материалы конференции могут быть полезны преподавателям вузов и средних учебных заведений, научным работникам, руководителям и специалистам предприятий, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

Все научные работы, представленные на конференции, прошли двойное рецензирование программным комитетом и редакционной коллегией.

УДК 658.512.2  
ББК Ж18я43

*Материалы статей предоставлены в электронном виде и сохраняют авторскую редакцию.*

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Незаконное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-1836-6 (общ.)  
ISBN 978-5-8265-2969-0 (вып. 11)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2025

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

**Приходько Вячеслав Михайлович** – сопредседатель программного комитета, советник при ректорате ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», д-р техн. наук, проф., член-корреспондент РАН.

**Краснянский Михаил Николаевич** – сопредседатель программного комитета, ректор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (ТГТУ), д-р техн. наук, проф., профессор РАН.

**Онысько Сергей Романович** – декан машиностроительного факультета Брестского государственного технического университета, Республика Беларусь, канд. техн. наук.

**Муромцев Дмитрий Юрьевич** – проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

**Сотник Леонид Леонидович** – декан инженерного факультета Барановичского государственного университета, Республика Беларусь, канд. техн. наук.

**Мищенко Сергей Владимирович** – советник при ректорате ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

**Позднеев Борис Михайлович** – председатель правления Ассоциации «Цифровые инновации в машиностроении», заведующий кафедрой «Информационные системы» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», д-р техн. наук, проф.

**Монастырев Павел Владиславович** – директор Института архитектуры, строительства и транспорта ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

**Тютюнник Вячеслав Михайлович** – профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», генеральный директор Международного Информационного Нобелевского Центра, д-р техн. наук, проф.

**Аверченков Владимир Иванович** – профессор кафедры «Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

**Сердюк Анатолий Иванович** – директор Аэрокосмического института ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», д-р техн. наук, проф.

## ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

**Карпов Сергей Владимирович** – сопредседатель, зав. кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» (КИСМ) ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», канд. техн. наук, доц.

**Мокрозуб Владимир Григорьевич** – сопредседатель, профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

**Немтинов Владимир Алексеевич** – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

**Обухов Артем Дмитриевич** – профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» (САПР) ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, доц.

**Глебов Алексей Олегович** – доцент кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», канд. техн. наук, доц.

**Соколов Михаил Владимирович** – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, доц.

**Карпушкин Сергей Викторович** – профессор кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», д-р техн. наук, проф.

**Родина Антонина Александровна** – старший преподаватель кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

**Трюфилькин Сергей Валентинович** – инженер кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

### **Секретарь конференции:**

**Румянцева Елена Евгеньевна** – старший лаборант кафедры КИСМ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

## СОДЕРЖАНИЕ

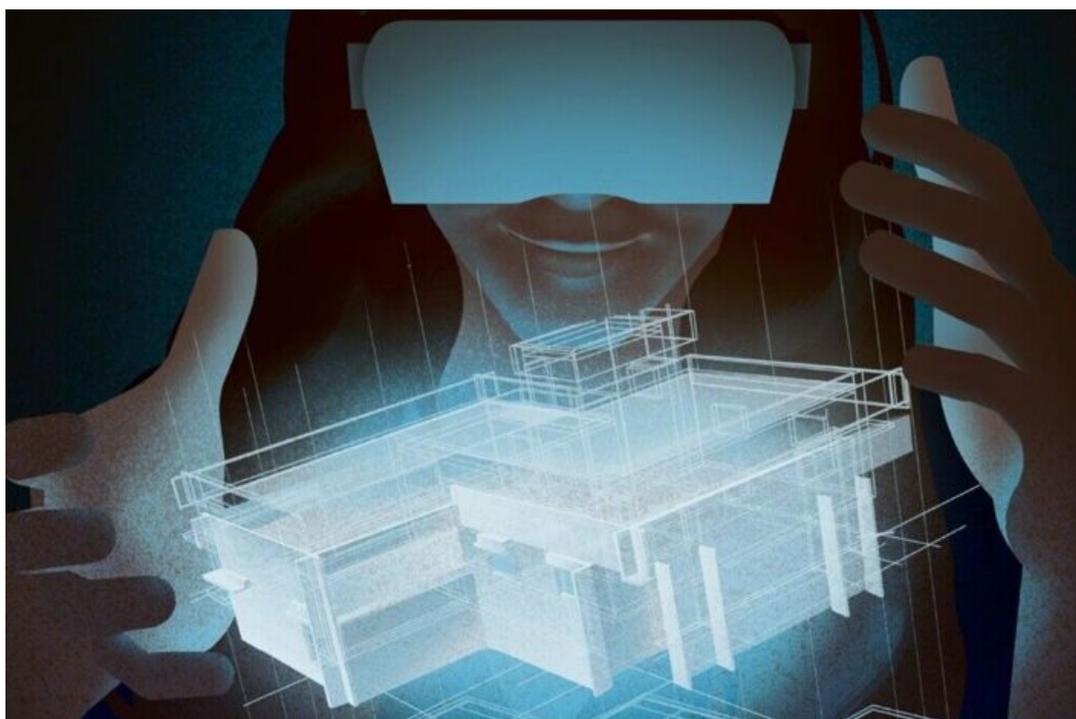
<b>Пленарные доклады</b> .....	9
<i>Шах А. В.</i> «Интерактивная визуализация материально-технической базы университета как современный инструмент конкурентной борьбы за абитуриента».....	10
<i>Рачкова С.А.</i> Школьное образование – распределенная организационно-техническая система .....	16
<i>Рябов В.В., Немтинов В.А.</i> Прогнозирование аномальной активности в массовой многопользовательской игре на основе анализа временного ряда активности в игровом сообществе .....	19
<i>Альсауди А.А.М.</i> Определение размеров кожухотрубных теплообменников с помощью моделей машинного обучения.....	26
<i>Жуков С.В.</i> Многокритериальный анализ способов оптимизации загрузки веб-страницы и их влияние на показатели производительности.....	30
<i>Бондаренко Н.В., Соколов М.В.</i> Возможности применения искусственного интеллекта на машиностроительных предприятиях.....	34
<i>Скоморохова А. И., Глебов А. О.</i> Оптимизация режимных параметров процесса вулканизации резинотехнических изделий.....	39
<b>Секция Виртуальное моделирование, визуализация и прототипирование технических систем</b> .....	45
<i>Губарева К.В.</i> Численное исследование температурного распределения в пористой структуре типа Schoen's Batwing с учётом диссипативных эффектов .....	46
<i>Карпушкин С.В., Джураев Б.Ш.</i> Проверка адекватности математической модели механического перемешивания в емкостных аппаратах .....	49
<i>Карпушкин С.В., Мартьянов Е.И.</i> Комплекс программ оптимизации процесса механического перемешивания жидкости в вертикальном емкостном аппарате .....	54
<i>Котов В.В., Бобро Е.В., Немтинов В.А.</i> Проблема сингулярности при обработке с постоянной скоростью резания на токарном оборудовании.....	61
<i>Мокрозуб В.Г., Звонков Д.Г., Полянский А.В., Нагайцев И.В.</i> Онтология определения времени сварки стальных обечаек.....	67
<i>Фарур Х., Борщев В. Я.</i> Проектирование каскадного гравитационного смесителя сыпучих материалов в SolidWorks.....	70
<i>Карпушкин С.В., Бухнина К.В.</i> Состав и структура цифрового двойника нагревательной плиты гидравлического пресса.....	76
<i>Шабунин Д. А., Немтинов В. А.</i> Совершенствование конструкции и технологии изготовления средств индивидуальной защиты органов дыхания .....	82
<i>Бредищева О.Ф.</i> Разработка автоматической системы защиты теплообменных аппаратов на основе многоуровневой адаптивной диагностики.....	86
<i>Попов С.В., Немтинов В.А.</i> Использование системного анализа для оптимизации производственных процессов в электроцитах.....	89

<i>Каиштанов В.В.</i> Гибридные навигационные системы для беспилотных летательных аппаратов.....	94
<i>Фидаров В.Х.</i> Сравнительные испытания стойкости инструментальных материалов при токарной обработке поршневых колец.....	102
<i>Фурсова А.В., Яковлев А.В.</i> Многоагентная система как основа адаптивной защиты ситуационного центра.....	106
<i>Майоров Н. И.</i> Моделирование кинематики пространственных манипуляторов.....	110
<i>Майоров Н. И., Обухов А.Д.</i> Разработка модели прямой кинематики реабилитационного манипулятора верхних конечностей.....	113
<i>Капустин С.С., Немтинов В.А., Торбин Д.А.</i> Использование реинжиниринга при разработке технологических процессов и организации производства вала коромысел САТ С-15.....	117
<i>Вехтева Н. А.</i> Алгоритмы анализа трехмерного цифрового чертежа и оптимизации fdm-печати за счет преобразования пространственной ориентации.....	120
<i>Волков А.А.</i> Выбор оптимальной длины полотна адаптивной беговой платформы для реабилитирующего виртуального тренажера.....	126
<i>Патутин К. И.</i> Формализованная постановка задачи выбора человеко-машинного интерфейса для реабилитирующих тренажеров.....	130
<i>Чупахин И.А., Гребенникова Н.М.</i> Умная тележка для офиса.....	134
<i>Илясов А.А., Татаринцев А.В., Попов А.В., Немтинов В.А.</i> Виртуальная модель цеха механообработки для создания цифрового помощника наладчика оборудования.....	136
<i>Селиванова З. М., Скоморохов К. В.</i> Математическая модель для оценки точности определения теплопроводности твердых материалов интеллектуальным средством измерений .....	140
<i>Санников С.А.</i> Постановка задачи проектирования гальванических линий.....	144
<i>Соболев Е.А., Соколов М.В.</i> Разработка и исследование гибридного зубчатого колеса с износостойким покрытием, наносимым на оптимизированную методом SLM основу.....	147
<b>Секция Виртуальное моделирование, визуализация и прототипирование социально значимых объектов.....</b>	<b>151</b>
<i>Шипилова А.Д., Носков А.Д., Морозов В.В.</i> О создании виртуального тура по сельским просторам с возможностью реализации оздоровительной программы и органическим земледелием .....	152
<b>Секция Проектирование и применение компьютерных имитационных моделей, виртуальных тренажеров и систем машинного зрения.....</b>	<b>156</b>
<i>Шильцын М.А., Никитников Ю.В., Волков А.А.</i> Разработка алгоритмического и программного обеспечения для реконструкции и моделирования цифрового представления пользователя .....	157

<i>Никитников Ю.В., Круглов В.С., Обухов А.Д.</i> Разработка мультиплатформенной системы классификации упражнений для опорно-двигательной реабилитации .....	160
<i>Круглов В.С., Шильцын М.А., Обухов А.Д.</i> Взаимодействие системы биологической обратной связи с системой опорно-двигательной реабилитации.....	163
<i>Свешников А. Ю.</i> Разработка модели функций управления информационной системы рекомендаций по выбору индивидуальной траектории обучения.....	167
<i>Майоров Н.И., Волков А.А., Обухов А.Д.</i> Разработка алгоритмического обеспечения взаимодействия имитационных компонентов опорно-двигательной реабилитации...	172
<i>Рыбачок М.В., Лопатко А.С., Обухов А.Д.</i> Разработка алгоритма управления верхним экзоскелетом на основе анализа мультисенсорных данных.....	176
<i>Божий А.А., Максимов И.И., Круглов В.С., Обухов А.Д.</i> Разработка модуля определения направления тела и скорости движения на основе данных инерциальных измерительных устройств.....	180
<i>Меркурьев Я.В.Х., Патутин К.И., Волков А.А.</i> Алгоритм адаптации виртуальной сцены и имитационных компонентов в системе опорно-двигательной реабилитации.	183
<b>Секция Создание электронных учебных материалов с применением технологий виртуального моделирования и прототипирования. Инженерная педагогика, моделирование процессов обучения и управления в образовании.....</b>	<b>187</b>
<i>Шапович Е.Г., Самсоник Н.А.</i> «Программное средство дополненной реальности для проведения профориентации Барановичского государственного университета».....	188
<i>Мокрозуб В.Г., Скворцова А.А, Кривенцев А.Н., Полянский А.В.</i> Создание электронных учебных материалов для изучения и расчета технологического оборудования ..	193
<i>Протасова Ю.В., Морозов В.В., Немтинов В. А.</i> Организация связи между LMS Moodle и системой визуализации виртуального образовательного пространства 3DVista .....	196
<b>Секция Промышленный дизайн.....</b>	<b>200</b>
<i>Казначеева Н.В., Немтинов В.А.</i> Системный анализ комплексных решений при формировании персонального имиджа организации .....	201
<i>Лобанов П.Г., Немтинов В.А.</i> Процедура принятия решения при выборе оптимального варианта устранения брака при изготовлении деталей из металлов .....	206
<i>Ермаков Р.А.</i> Информационная модель кожухотрубчатого теплообменника с u – образными трубами.....	210
<i>Степанян А.К.</i> Программа построения трубной решетки кожухотрубчатого теплообменника.....	214
<b>Секция Современные средства обработки информации.....</b>	<b>218</b>
<i>Мокрозуб В.Г., Полянский А.В., Нагайцев И.В.</i> Информационная модель определения режимов сверления .....	219
<i>Пачин А.В., Соколов М.В.</i> Создание баз данных и их анализ для системы прогнозирования расходов при фрезеровании элементов декора мебели .....	222

<i>Юмашев И.А., Немтинов В.А.</i> Проведение технического обслуживания и ремонта эндуро-мототехники с использованием программных средств .....	226
<i>Шубин Я.С., Глебов. А.О.</i> Применение управляющей программы-шаблона при гравировании на 3-х осевом фрезерном станке с ЧПУ.....	231
<i>Бирюлина Я.А., Мокрозуб В.Г.</i> Алгоритм перевода текста в чертежах.....	234
<i>Обухов А.Д., Волков А.А., Дудин М.А.</i> Разработка алгоритмического и программного обеспечения модулей сбора и обработки данных для системы опорно-двигательной реабилитации.....	237
<b>Секция Биотехнические системы и технологии .....</b>	<b>241</b>
<i>Ушаков А.Ю.</i> Математическое моделирование механики дыхания человека: одно-компарментная модель с валидацией на экспериментальных данных.....	242
<i>Евстигнеева Е.П., Фролова Т.А.</i> Критерии выбора и метод рационализации оснащения офтальмологического кабинета.....	247
<i>Леньшин С. Г.</i> Отслеживания и визуализации актуального местоположения и траектории движения катетера эндоскопического зонда.....	250
<i>Любавина М. А., Фролова Т.А.</i> Разработка системы мониторинга двигательной и звуковой активности младенца.....	254
<i>Кузнецова А.В., Петров И.Э., Фролов С.В.</i> Особенности разработки программного обеспечения прототипа умных очков с функцией транскрибирования речи для людей с нарушениями слуха.....	256

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ



УДК 004.946

**Шах А. В.**

Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,  
Республика Беларусь, г. Барановичи  
e-mail: shah.al.vas@gmail.com

**ИНТЕРАКТИВНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ  
БАЗЫ УНИВЕРСИТЕТА КАК СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТ  
КОНКУРЕНТНОЙ БОРЬБЫ ЗА АБИТУРИЕНТА**

**Shakh A. V.**

Educational Institution "Baranovichi State University",  
Republic of Belarus, Baranovichi  
e-mail: shah.al.vas@gmail.com

**INTERACTIVE VISUALIZATION OF UNIVERSITY INFRASTRUCTURE AS A  
CONTEMPORARY TOOL FOR COMPETITIVE RECRUITMENT OF  
PROSPECTIVE STUDENTS**

*Аннотация.* В статье анализируется применение интерактивной визуализации материально-технической базы университетов как инструмента конкурентной борьбы за абитуриентов в условиях демографического спада и цифровизации образования. На примере Барановичского государственного университета показаны практические реализации 360°-туров с интерактивными точками, полноценных 3D-моделей лабораторий и аудиторий (Blender, Unity3D, Unreal Engine), а также перспективных VR/AR-технологий. Автор показывает, что эти инструменты преодолевают ограничения традиционных методов презентации инфраструктуры, создают эмоционально вовлекающий опыт для абитуриентов и повышают конверсию в подачу документов.

*Ключевые слова:* интерактивная визуализация, материально-техническая база, 3D-туры, виртуальная реальность, цифровизация образования, VR/AR-технологии, Барановичский государственный университет.

*Abstract.* The article analyzes the application of interactive visualization of university material and technical infrastructure as a tool for competitive struggle for applicants in the context of demographic decline and digitalization of education. Using the example of Baranovichi State University, practical implementations are demonstrated: 360° tours with interactive points, full 3D models of laboratories and classrooms (Blender, Unity3D, Unreal Engine), as well as promising VR/AR technologies. The author shows that these tools overcome the limitations of traditional methods of infrastructure presentation, create an

emotionally engaging experience for applicants, and increase conversion to document submission.

*Keywords:* interactive visualization, material and technical infrastructure, 3D tours, virtual reality, digitalization of education, VR/AR technologies, Baranovich State University.

Современный рынок высшего образования Республики Беларусь переживает период трансформации, характеризующийся обострением конкуренции между университетами на фоне устойчивого демографического спада и ускоренной цифровизации образовательных процессов. Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь, численность детей и молодежи, составляющих основной контингент абитуриентов, сократилась за последнее десятилетие [1], что создает дефицит абитуриентов и вынуждает ВУЗы активно развивать конкурентные стратегии привлечения и удержания обучающихся. Одновременно цифровая трансформация меняет ожидания поколения Z и альфа, для которых прозрачность, интерактивность и визуальная наглядность информации становятся критически важными факторами при выборе образовательной траектории.

В этих условиях материально-техническая база (далее — МТБ) университета приобретает статус ключевого конкурентного преимущества. Современные лаборатории, инновационное оборудование, цифровые образовательные платформы и инфраструктура учебных корпусов формируют у абитуриентов представление о качестве образования и перспективах будущей профессиональной деятельности. Однако традиционные методы презентации МТБ — статичные фотографии на сайтах, текстовые описания в буклетах и экскурсии в ограниченном формате — демонстрируют крайне низкую эффективность в условиях цифровой реальности. Большинство абитуриентов Республики Беларусь считают текущую информацию о материально-технической базе университетов недостаточно полной и убедительной, а многие отмечают сложность в понимании возможностей ВУЗа без личного посещения, что особенно критично для иногородних и иностранных абитуриентов из-за финансовых или временных ограничений.

Этот информационный разрыв создает системную проблему — университеты обладают значительным потенциалом в области МТБ, но не могут эффективно транслировать его целевой аудитории, что снижает их конкурентоспособность.

Традиционные маркетинговые инструменты, такие как печатные информационные материалы, справочники абитуриента, публикации в региональных СМИ, образовательные выставки с раздаточными материалами и т.п. не отвечают запросам цифрового поколения, предпочитающего интерактивные и персонализированные способы взаимодействия с информацией. Таким образом, возникает острая необходимость в разработке современных инструментов визуализации, способных не только достоверно отразить материально-технические возможности университета, но и создать эмоционально вовлекающий опыт для потенциальных абитуриентов, который позволил бы вдохновить, вызвать отклик и сформировать чувство принадлежности к ВУЗу ещё до подачи документов.

В условиях цифровой трансформации образования становится важным внедрение современных методов интерактивной визуализации МТБ университета. Эти технологии позволяют преодолеть ограничения традиционных подходов и создать эмоционально вовлекающий опыт для потенциальных абитуриентов.

Одним из вариантов решения данной проблемы становится создание и демонстрация 3D-туров и виртуальных экскурсий, которые представляют собой цифровые двойники, воссоздающие материально-техническую базу университета в интерактивном формате. В отличие от статичных фотографий или видеороликов, эти технологии предоставляют абитуриенту возможность самостоятельного исследования инфраструктуры ВУЗа с функцией свободного перемещения, масштабирования и взаимодействия с объектами.

Одним из первых способов интерактивная визуализация материально-технической базы в Барановичском государственном университете стало использование панорамного 360°-тура с интерактивными точками, доступного по адресу <https://virtual.barsu.by/> (рис. 1).

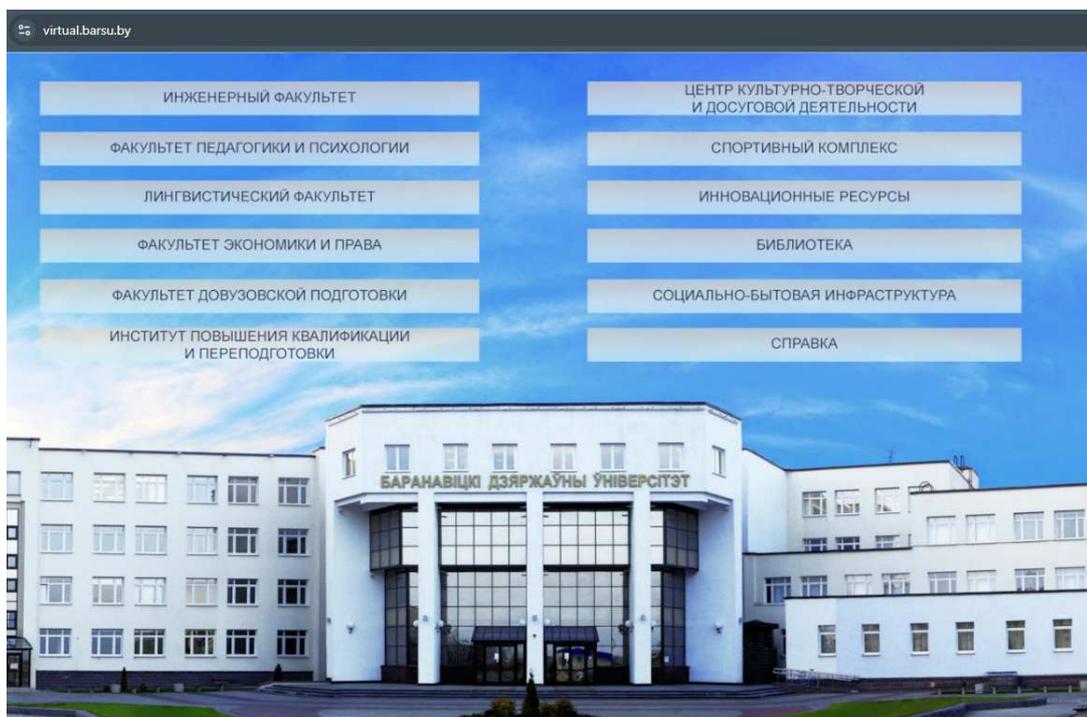


Рис. 1. Главная страница виртуального тура по Барановичскому государственному университету

Виртуальный тур представляет собой цифровые реконструкции реальных помещений, созданные с помощью специализированных камер и программного обеспечения [2]. Ключевая особенность — возможность добавления интерактивных точек, активируемых пользователем для получения дополнительной информации о технических характеристиках оборудования, фото/видео демонстрации работы и т.д. (рис. 2).



Рис. 2. Просмотр учебной лаборатории надежности и ремонта сельскохозяйственной техники

Виртуальный тур доступен 24/7, что особенно важно для иностранных абитуриентов из разных часовых поясов.

Также в университете созданы полноценные 3D-модели лабораторий и лекционных аудиторий в программе Blender с физическим движком (Unity3D, Unreal Engine). В данном случае цифровые двойники позволяют воссоздать не только визуальное, но и функциональное состояние объектов МТБ [3].

На рис. 3 представлен вид одной из лекционных аудиторий университета.



Рис. 3. Посещение лекционной аудитории университета

Управление персонажем в приложении реализовано через стандартные клавиши движения (W, A, S, D), что обеспечивает удобство и привычность взаимодействия для большинства пользователей. Для выполнения дополнительных действий предусмотрены дополнительные клавиши: например, клавиша «Shift» используется для

приседания, что может быть полезно для изучения объектов, расположенных на нижних уровнях кабинета. Камера может быть приближена с помощью клавиши «С», что позволяет более детально рассмотреть элементы интерьера или объекты в виртуальной среде, делая процесс исследования максимально комфортным.

Особое внимание уделено возможности взаимодействия с доской, расположенной в кабинете. Пользователь может подойти к доске и, удерживая правую кнопку мыши, начать рисовать линии, создавая надписи, графики или рисунки. Процесс настолько интуитивно понятен, что не требует активации специальных режимов или дополнительных действий, что делает его доступным для пользователей с любым уровнем подготовки.

Так же пользователь может просматривать характеристики и дополнительную информацию оборудования в специализированных кабинетах (рис. 4).



Рис. 4. Информационная карточка 3D принтера Ghost 6

В настоящее время идут разработки программного обеспечения для использования VR-очков для создания эффекта присутствия в университетском пространстве. VR-туры обеспечат полное погружение в виртуальную среду с возможностью перемещения между лабораториями и детального изучения оборудования. Специфика привлечения будущих инженеров требует демонстрации не только теоретических знаний, но и практических возможностей для развития технических компетенций, что делает игровые механики стратегически важным инструментом маркетинговой стратегии ВУЗа.

В заключении необходимо отметить, что интерактивная визуализация материально-технической базы университета представляет собой стратегически значимый инструмент конкурентной борьбы за абитуриентов в условиях демографического спада и цифровой трансформации высшего образования. Традиционные маркетинговые инструменты демонстрируют низкую информативность и не способны сформировать эмоциональную вовлеченность абитуриентов. В то же время современные информационные технологии обеспечивают многократное увеличение времени взаимодействия с контентом, повышение конверсии в подачу документов и формирование устойчивой лояльности к университету.

Список использованных источников

1. Численность населения на начало периода по территории Республики Беларусь — URL: <https://dataportal.belstat.gov.by/osids/indicator-info/10101100003> / (дата обращения: 03.11.2025).
2. Шапович Е. Г. Виртуальная экскурсия как средство повышения имиджа учреждения высшего образования / Е. Г. Шапович, Ю. Е. Горбач, А. В. Шах / Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Международной научно-практической конференции / под общ. ред. М. Н. Краснянского ; ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ» — С. 154–159.
3. Грушевский, К. Н. Создание виртуальной лаборатории аддитивных технологий в Unity / К. Н. Грушевский, А. Н. Коваль, А. В. Шах // Наука – практике : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 17 мая 2024 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Климук (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : БарГУ, 2024. — Ч. 1. — С. 194-196.

УДК 4.009

**Рачкова С.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: svdighome@mail.ru

## **ШКОЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ – РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА**

**Rachkova S.A.**

Tambov State Technical University, Tambov, Russia  
e-mail: svdighome@mail.ru

### **SCHOOL EDUCATION IS A DISTRIBUTED ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL SYSTEM**

*Аннотация.* Приведено доказательство, что система школьного образования является распределенной организационно-технической системой.

*Ключевые слова:* школьное образование, распределенная организационно-техническая система.

*Abstract.* The proof is given that the school education system is a distributed organizational and technical system.

*Keywords:* school education, a distributed organizational and technical system.

Система школьного образования в значительной степени влияет на развитие любого государства. От правильной классификации этой системы в значительной степени зависит правильное понимание процессов, происходящих в системе и управлений этими процессами. Существует три типа систем: технические, организационные и организационно-технические.

«Техническая система – искусственно созданная система, предназначенная для удовлетворения определенной потребности, существующая: 1) как изделие производства, 2) как устройство, потенциально готовое совершить полезный эффект, 3) как процесс взаимодействия с компонентами окружающей среды, в результате которого образуется полезный эффект» [1].

Организационная система – «объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур и правил» [2].

Организационно-техническая система «сложная искусственно (создаваемая людьми) система, включающая людей, и, быть может, технические и природные элементы» [3].

Рассмотрим аналогию системы школьного образования с технической системой, например, с системой машиностроения [4,5]. Назначение этой системы – изготовление

продукции, например, деталей. Существует оборудование (станки, приспособления), на которых деталь изготавливаются, заготовка и технология, по которой на заданном оборудовании из заданной заготовки получается готовая деталь.

По аналогии в системе школьного образования имеется «заготовка» – дети, которые пришли в школу, «готовая продукция» – выпускники школы, технология обучения (программы предметов, способы контроля знаний и др.), и оборудование (учебные помещения, технические устройства для проведения занятий), на котором осуществляется процесс обучения.

Следует отметить, что при изготовлении машиностроительных деталей свойства заготовки достаточно постоянны, чего не скажешь об учениках, которые имеют не только разный интеллектуальный потенциал, но и разный характер. Кроме того, с возрастом черты характера меняются. Все это усложняет технологию обучения (технологию производства).

Для выпуска продукции машиностроительными предприятиями одного оборудования недостаточно, нужны еще люди, которые на этом оборудовании работают. Даже в условиях высокой степени автоматизации, необходимы сотрудники, которые составляют и загружают программы для станков с программным управлением. Таким образом, в современных условиях машиностроительные предприятия относятся в соответствии с определением [3] к организационно-техническим системам.

То же самое можно сказать и про систему школьного образования, которая является организационно-технической системой (ОТС), рис. 1., включающей в себя людей (коллектив учеников и педагогический состав) и техническую составляющую (школы, техническое оснащение школ) [6]. Кроме того, эта система распределена в пространстве и во времени.



Рис. 1. Структура ОТС Школа

Список использованных источников

1. Некрасов, С.И., Некрасова Н.А. Философия науки и техники: тематический словарь справочник. Учебное пособие. / С.И. Некрасов, Н.А. Некрасова Н.А. – Орёл: ОГУ, 2010. – 289 с.
2. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2012. – 604 с.
3. Белов, М. В. Управление жизненными циклами организационно-технических систем / М. В. Белов, Д. А. Новиков. – Москва : Ленанд, 2020. – 384 с. – ISBN 978-5-9710-6962-1. – EDN HQYLQR.
4. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
5. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326-331. – DOI 10.1007/s10556-017-0342-6. – EDN XNSPGA.
6. Рачкова, С. А. Теоретико-множественный подход к решению задач организационно-технической системы школьного образования / С. А. Рачкова, В. Г. Мокрозуб // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2025. – Т. 31, № 2. – С. 245-258. – DOI 10.17277/vestnik.2025.02.pp.245-258. – EDN ROJELG.

УДК 004.9

**Рябов В.В.<sup>1</sup>, Немтинов В.А.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: ryabov.vv@inbox.ru

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В МАССОВОЙ  
МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ИГРЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННОГО  
РЯДА АКТИВНОСТИ В ИГРОВОМ СООБЩЕСТВЕ**

**Ryabov. V. V., Nemtinov V.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: ryabov.vv@inbox.ru

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**FORECASTING ANOMALOUS ACTIVITY IN A MASSIVELY MULTIPLAYER  
ONLINE GAME BASED ON ANALYSIS OF TIME SERIES OF COMMUNITY  
ENGAGEMENT**

*Аннотация.* В статье представлены результаты апробации метода прогноза негативных событий в программных продуктах с сетевым эффектом на основе анализа временных рядов в сообществе игроков массовой многопользовательской игры и вычисления функции отклонения от базового тренда. Описаны этапы сбора, обработки и анализа данных об активности акторов игрового сообщества в форуме. На примере анализа реальных событий показана возможность формирования прогнозных сигналов о начале масштабных коалиционных действий акторов, направленных на организованные изменения игровой экономики. Полученные результаты подтверждают эффективность подхода и демонстрируют его применимость для задач мониторинга и прогнозирования согласованного поведения в цифровых средах с сетевым эффектом.

*Ключевые слова:* временной ряд, многопользовательская игра, прогнозирование.

*Abstract.* This paper presents the results of applying a method for forecasting negative events in software products with network effects, based on the analysis of time series of activity within a community of players in a massively multiplayer online game and the calculation of a deviation function from a baseline trend. The stages of data collection, processing and analysis actors' activity in the game community forum are described. Using real-world events as a case study, the possibility of generating predictive signals regarding the onset of large-scale coordinated actions by actors aimed at organized changes to the in-game economy is demonstrated. The obtained results confirm the effectiveness of the approach and

highlight its applicability for monitoring and forecasting coordinated behavior in the digital environments with network effects.

*Keywords:* time series, massively multiplayer online game, forecasting.

Анализ потенциально негативных событий, обусловленных самоорганизацией и согласованными действиями акторов, требует расширения сферы мониторинга за пределы традиционных социальных сетей и мессенджеров. Особое внимание следует уделить многопользовательским онлайн-играм, которые представляют собой сложные цифровые экосистемы с высокой степенью взаимодействия между пользователями. В таких средах акторы имеют возможность не только коммуницировать и формировать устойчивые сообщества, но и координировать коллективные действия, объединяться в коалиции, а также оперировать как внутриигровыми активами, так и реальными денежными средствами в форме виртуальных товаров.

Дополнительным подтверждением значимости данного направления служит высокая популярность игровых платформ. По данным Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, только за четвертый квартал 2022 года в России было зафиксировано 673 миллиона установок мобильных игр, что составляет 24% от общего числа установок в странах Европы. Кроме того, за первые восемь месяцев 2022 года объем продаж коробочных версий игр для персональных компьютеров и игровых консолей составил порядка 1,1 миллиона экземпляров [1].

Учитывая масштаб пользовательской активности и экономическую значимость действий акторов в играх, актуальной задачей становится задача мониторинга и прогнозирования резких изменений в поведении акторов. Решение этой задачи необходимо как для обеспечения устойчивости технической инфраструктуры, так и для поддержания баланса и стабильности внутриигровых процессов.

В качестве примера рассмотрим событие, произошедшее в январе 2014 года в многопользовательской игре EVE Online. В ходе согласованных действий акторов, направленных на изменение баланса сил в виртуальном пространстве игры, 27 января 2014 года более 7500 игроков взаимодействовали в рамках единой активности, которое получило название «Battle of B-R5RB» и стало одним из крупнейших по масштабу конфликтов в истории MMO (massively multiplayer online) игр [2]. По оценкам аналитиков, совокупная стоимость утраченных игроками активов составила сумму, эквивалентную 330 000 долларов США [3]. Значимость данного события вышла за пределы игровой среды, о нем сообщали профильные издания [4], а рост интереса пользователей отражен в динамике поисковых запросов, связанных с игрой (см. рис. 1), что свидетельствует о высоком общественном резонансе.

Для анализа пользовательской активности были использованы данные, охватывающие период конца 2013 – начала 2014 года. В качестве источника информации выбран русскоязычный форум игроков игры EVE Online [5]. В качестве основы для анализа использована архивная версия форума, которая, с одной стороны, содержит данные за релевантный временной интервал, а с другой – предоставляет

устойчивую и удобную для автоматизированной обработки HTML-структуру (HyperText Markup Language) [6]. Публикации на форуме упорядочены хронологически и сопровождаются метаданными: количеством ответов, отметок «нравится» и просмотров, что обеспечивает достаточный объем информации для построения временных рядов активности.



Рис. 1. Интерес к игре EVE Online по данным сервиса Google Trends

Сбор данных осуществлялся с помощью языка программирования Python и библиотек requests и BeautifulSoup [7]. В результате был собран набор данных, включающий информацию об активности по 589 темам исследуемого раздела форума, содержащим в совокупности 10752 ответа, 8255 отметок «нравится», и 4046765 просмотра. Анализ связей между параметрами показал высокую степень корреляции, коэффициент Пирсона [8] между числом отметок «нравится» и ответов на темы составил 0,86, а между количеством просмотров и ответов 0,91 [8], что свидетельствует о высокой согласованности поведенческих метрик.

Однако выявлено расхождение с предполагаемой иерархией активности акторов [9], так как количество отметок нравится оказалось меньше числа ответов, что противоречит ожидаемому порядку вовлеченности. Данное явление может быть обусловлено как особенностями поведения акторов конкретного игрового сообщества, так и техническими ограничениями платформы, влияющими на отображение статистики. В связи с этим метрика «количество отметок «нравится» исключена из дальнейшего анализа.

Количество созданных тем также не используется в модели, поскольку их число в исследуемом разделе форума значительно ниже, чем в популярных сообществах социальных сетей, что может приводить к ложным сигналам при анализе резких изменений активности [10]. Учитывая высокую корреляцию между количеством просмотров и ответов (см. рис. 2), для исключения эффекта мультиколлинеарности [11]

в прогнозную модель включен только один параметр – число ответов, так как он соответствует более высокому уровню вовлеченности в иерархии действий акторов по сравнению с просмотрами [9].

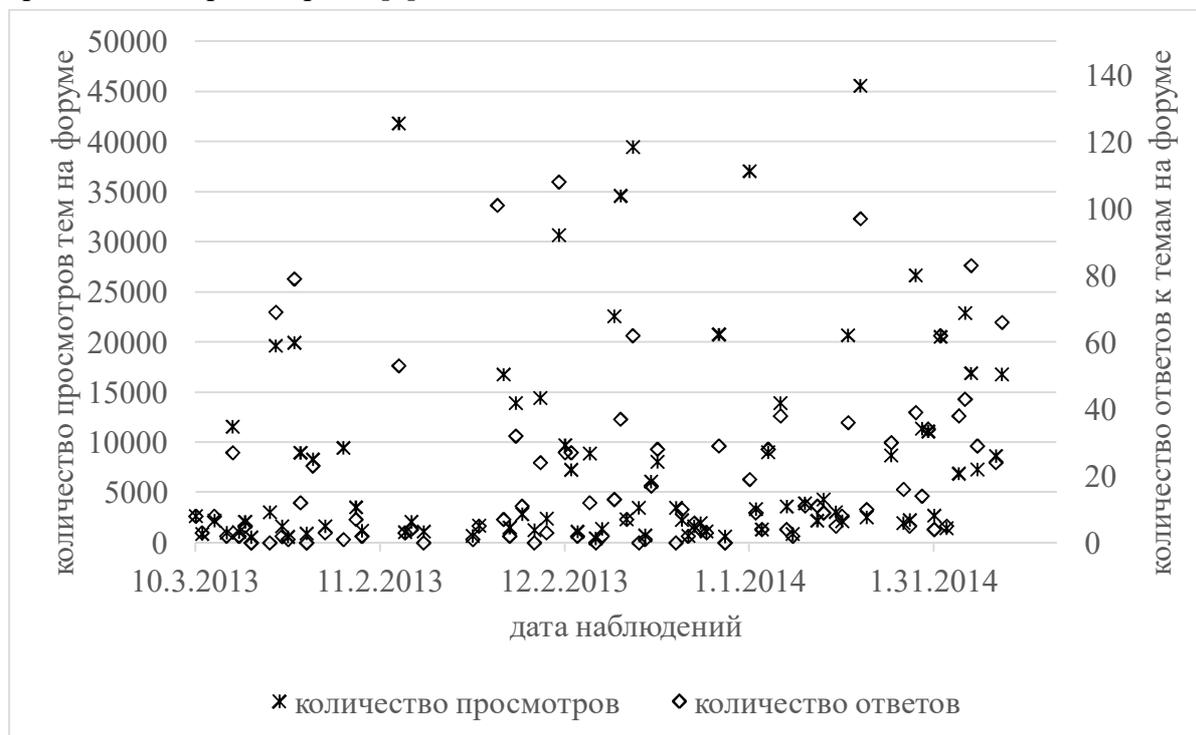


Рис. 2. Соотношение количества ответов раздела общих вопросов форуме игроков EVE online и количества просмотров, коэффициент корреляции Пирсона равен 0,91

По аналогии с подходом, примененным при анализе сообщества wallstreetbets социальной сети Reddit [10], прогнозный сигнал будем считать успешным, если он формируется за две недели до начала резкого роста активности. В рассматриваемом случае этим периодом является интервал с 13 по 26 января 2014 года включительно. Сигналы, выявленные до или после указанного временного окна, классифицируются как ложные. При этом дата 27 января 2014 года (день начала скоординированного действия акторов в игре Eve Online) также исключается из числа допустимых моментов формирования прогнозного сигнала, поскольку после обнаружения сигнала требуется время для анализа ситуации, принятия решений и реализации управляющего воздействия.

Прогноз резкого роста активности осуществляется с использованием модифицированного алгоритма выявления роста активности на основе иерархии действия акторов, модифицированного для программных продуктов с сетевым эффектом [10, 12]. Алгоритм включает следующие этапы:

1. агрегацию данных о количестве ответов на публикации по дням [13];
2. сглаживание временного ряда методом скользящего среднего [14];
3. построение функции отклонения между текущими и сглаженными значениями тренда;
4. определения порога превышения и выявления прогнозных сигналов [10].

В качестве порога отсечения используется адаптивное значение, равное сумме среднего уровня функции отклонения и удвоенного стандартного отклонения на рассматриваемом временном интервале [15]. Это позволяет автоматически учитывать изменения волатильности и снижает вероятность ложных срабатываний.

В ходе вычислительного эксперимента было выявлено три прогнозных сигнала, из которых два были классифицированы как ложные, а один (сформированный 21 января 2014 года) оказался успешным (см. рис. 3). Данный сигнал был зафиксирован за шесть дней до начала массовых согласованных действий, что подтверждает способность предложенного подхода к раннему выявлению аномальной активности в игровых сообществах.

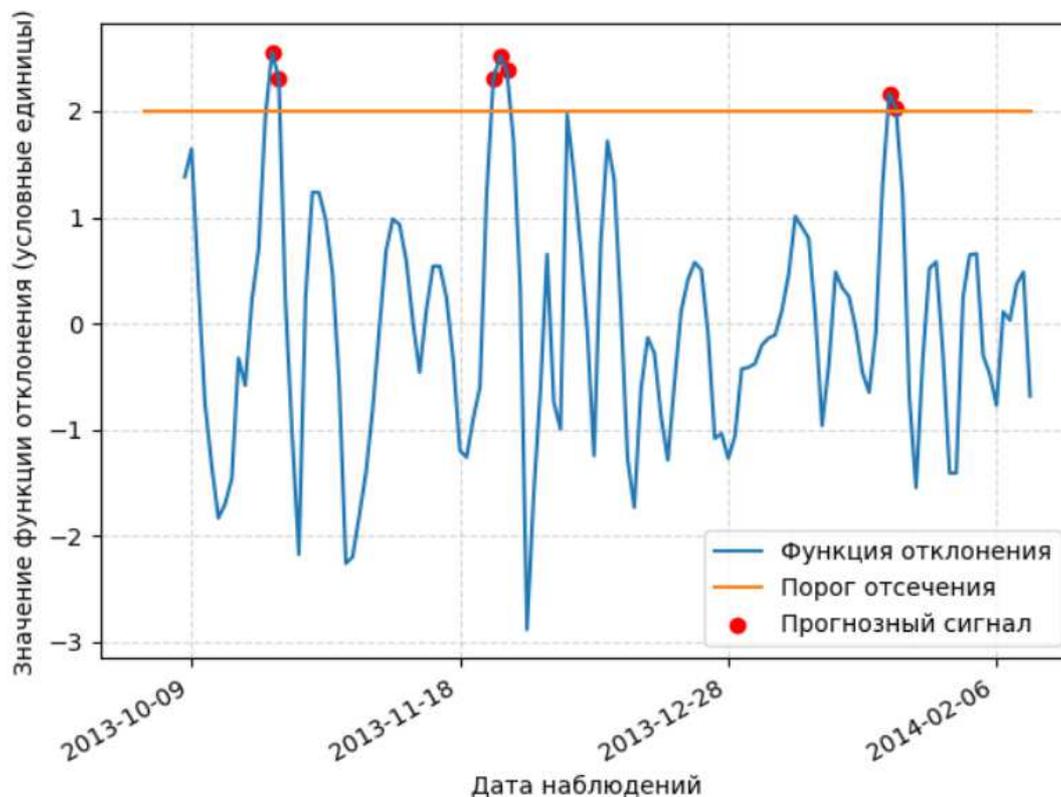


Рис. 3. Функция отклонения и поиск прогнозных сигналов на основе данных активности в русскоязычном разделе форума игроков Eve Online

Полученный результат свидетельствует о работоспособности метода на фоне относительно низкого уровня ложных срабатываний. Интервал в шесть дней является достаточным для проведения анализа ситуации, принятия решений и реализации управляющих воздействий со стороны разработчиков или администраторов игрового проекта, что особенно важно для обеспечения стабильности технической инфраструктуры и баланса игровой среды.

Таким образом был сделан вывод о том, что аномальная активность акторов в массовых многопользовательских онлайн-играх поддается прогнозированию с использованием методов анализа временных рядов и функции отклонения от базового тренда [10]. Это позволяет рассматривать игровые сообщества как полноценный объект

мониторинга, аналогично другим программных продуктам с сетевым эффектом, таким как социальные сети и форумы.

Данные, собранные об активности акторов в играх, представляют собой ценный ресурс для обучения и улучшения моделей прогнозирования, поскольку они характеризуются высокой степенью структурированности и четкой привязкой к внешним событиям. В перспективе такие данные могут быть использованы для разработки более сложных моделей анализа коллективного поведения, включая применение машинного обучения и графовых подходов.

#### Список использованных источников

1. Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Отраслевой доклад «Интернет в России в 2022 – 2023 годах» [Электронный ресурс]. - URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/internet-v-rossii-v-2022-2023-godah.pdf> (дата обращения 18.09.2025).
2. Li, M. Investigating the Moderating Effect of Massively Multiplayer Online (MMO) Games on the Correlation Between Flow and Game Addiction: A Meta-Analysis / M. Li, W. Hui, T. Reiners // *Australasian Journal of Information Systems*. – 2023. – Vol. 27. – DOI 10.3127/ajis.v27i0.3995. – EDN ZKKDMZ.
3. Fielder, Ja. D. Ghosts of the Titanomachy: Structure, Commitment, Economics, and Risk as Causal Mechanisms in an Online Battle / Ja. D. Fielder // *Simulation and Gaming*. – 2022. – Vol. 53, No. 3. – P. 265-284. – DOI 10.1177/104687812211075659. – EDN QLRDVW.
4. PCGAMER. EVE Online's biggest ever battle: trillions of ISK in damages and over 70 titans lost [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.pcgamer.com/eve-onlines-biggest-ever-battle-trillions-of-isk-in-damages-and-over-70-titans-lost/> (дата обращения 18.09.2025).
5. EVE Forums [Электронный ресурс]. - URL: <https://forums-archive.eveonline.com/> (дата обращения 18.09.2025).
6. Kaur, S. Prediction of design aspects of web page by HTML parser / S. Kaur, S. Gupta // *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*. – 2018. – Vol. 5, No. 2. – P. 143-158. – DOI 10.29121/ijetmr.v5.i2.2018.157. – EDN NYZLZG.
7. Oprea, S. V. Why Is More Efficient to Combine BeautifulSoup and Selenium in Scraping For Data Under Energy Crisis / S. V. Oprea, A. Bâra // *Ovidius University Annals. Economic Sciences Series*. – 2023. – Vol. 22, No. 2. – P. 146-152. – DOI 10.61801/ouaess.2022.2.19. – EDN LHAZJS.
8. Баврина, А. П. Современные правила применения корреляционного анализа / А. П. Баврина, И. Б. Борисов // *Медицинский альманах*. – 2021. – № 3(68). – С. 70-79. – EDN TPSSIX.
9. Ryabov V.V., Nemtinov V.A., Protasova Yu.S., Praveen P.K., Morozov V.V. Prospects for Predicting Coordinated Actions by Large Groups of Users Based on the Hierarchy of Activity in Social Networks // *Business Intelligence and Data Analytics (BIDA*

2024) / Eds. A. Verma, J. Zhang, A. Chandra Pandey. – Singapore : Springer, 2025. – Vol. 413. – P. 12–23. – DOI: 10.1007/978-981-97-7717-4\_2 .

10. Рябов, В. В. Прогнозирование согласованных действий акторов в программном продукте с сетевым эффектом / В. В. Рябов, В. А. Немтинов, В. В. Алексеев // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2025. – № 2. – С. 38-50. – DOI 10.14357/20718632250204. – EDN CGMHNSO.

11. Катруца А. М., Стрижов В. В. Проблема мультиколлинеарности при выборе признаков в регрессионных задачах // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 1. С. 8-18.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615409 Российская Федерация. Поиск прогнозных сигналов о резком росте активности в сообществе социальной сети по данным о комментариях : заявл. 19.02.2025 : опубл. 04.03.2025 / В. В. Рябов, В. А. Немтинов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

13. Устинов, А. Ф. Применение методов агрегации в информационных системах / А. Ф. Устинов // Научный Лидер. – 2023. – № 30(128). – С. 27-29. – EDN YSZCFV.

14. Шилов, А. В. Возможности и недостатки использования скользящей средней при выработке прогнозных решений / А. В. Шилов // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2015. – № 19. – С. 88-94. – EDN UNFIAD.

15. Watson, J. The practice of statistics / Watson, J., Fitzallen, N., Fielding-Wells, J., & Madden, S. // International handbook of research in statistics education. – Cham : Springer International Publishing, 2017. – С. 105-137.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664943 Российская Федерация. Анализ временных рядов для определения параметров прогностической модели аномальной активности в системах с сетевым эффектом : заявл. 19.05.2025 : опубл. 09.06.2025 / В. В. Рябов, В. А. Немтинов ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

УДК 004.9

**Альсаиди А.А.М.**University of Baghdad, Ирак, Багдад  
e-mail: abbas.atwan@gmail.com**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КОЖУХОТРУБНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ  
С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ****Alsaedi A.A.M**University of Baghdad, Iraq, Baghdad  
e-mail: abbas.atwan@gmail.com**DETERMINATION OF SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER  
DIMENSIONS USING MACHINE LEARNING**

*Аннотация.* Представлено определение размеров кожухотрубчатых теплообменников с использованием моделей машинного обучения. Была оценена точность четырех алгоритмических моделей, включая: искусственные нейронные сети (ANN), дерево решений (Decision Tree), многослойный перцептрон (MLP) и алгоритм экстремального градиентного бустинга (XGBoost). Экспериментальные результаты показали значительное превосходство модели искусственных нейронных сетей (ANN) по сравнению с другими моделями. Точность модели ANN – 99.32%. Доказана возможность применения этих моделей в системах автоматизированного проектирования.

*Ключевые слова:* кожухотрубный теплообменник, определение размеров теплообменника, машинное обучение.

*Abstract.* The size determination of shell-and-tube heat exchangers using machine learning models is presented. The accuracy of four algorithmic models was evaluated, including: artificial neural networks (ANN), Decision Tree, multilayer perceptron (MLP), and extreme gradient boosting algorithm (XGBoost). Experimental results have shown a significant superiority of the artificial neural network (ANN) model compared to other models. The accuracy of the ANN model is 99.32%. The possibility of using these models in computer-aided design systems is proved.

*Keywords:* shell-and-tube heat exchanger, heat exchanger sizing, machine learning.

Shell and Tube Heat Exchangers are vital components in industrial systems, playing a pivotal role in achieving thermal and operational efficiency in industrial processes, particularly in the field of chemical processing. The precise design of these heat exchangers relies on accurate thermal and mechanical requirements, necessitating the use of advanced design methodologies.

Mathematical models provide a theoretical framework for optimizing the performance of these heat exchangers. However, traditional experimental models face challenges related to their limited accuracy and reliance on oversimplified assumptions, which may reduce their practical effectiveness.

The design process of shell-and-tube heat exchangers encompasses traditional design stages (analysis of process requirements, study of mechanical durability, development of detailed design). [1,2].

To develop computer-aided design systems for heat exchangers [3,4], it is essential to determine the dimensions of their basic components. This is carried out based on multiple criteria, including (heat transfer surface area calculated according to the outer tube diameter, device type identification [5,6], and geometric and physical measurements).

The dimensional determination of elements for Shell and Tube Heat Exchangers is governed by technical documentation, such as TU 3612-024-00220302-02 "Shell-and-tube heat exchangers with stationary tube sheets, and shell-and-tube heat exchangers equipped with thermal compensators on the shell."

In [5], the structure of the shell-and-tube heat exchanger information model is presented, which illustrates the main parameters of the heat exchanger.

This research paper investigates machine learning methods for determining the basic dimensions of heat exchanger elements.

The training data was taken from Tables (2, 3, 6) of TU 3612-024-00220302-02. It included the heat transfer surface area along the outer tube diameter and the basic dimensions of the heat exchanger according to each device type (the total length of the heat exchanger; tube length; shell inner diameter; shell outer diameter; number of passes; tube diameter; distance between the centers of the shell-side inlet/outlet nozzles; nominal diameter of the shell-side inlet/outlet nozzles; distance from the apparatus axis to the end of the shell-side nozzle; distance from the axis of the lower shell-side nozzle to the end of the shell-side nozzle; baffle spacing; number of baffles; distance from the axis of the upper shell-side nozzle to the support leg bearing plate).

The following machine learning methods were used in the study: Artificial Neural Networks (ANN), Decision Tree, Multi-Layer Perceptron (MLP), and Extreme Gradient Boosting (XGBoost). To ensure the reliability of the results, the data was split into two sets: 70% for training and 30% for testing.

Figure 1 shows the structure of the artificial neural networks (ANN), which achieved the highest accuracy 99.32% compared to other methods. Table 1 presents the accuracy evaluation results of the methods used.

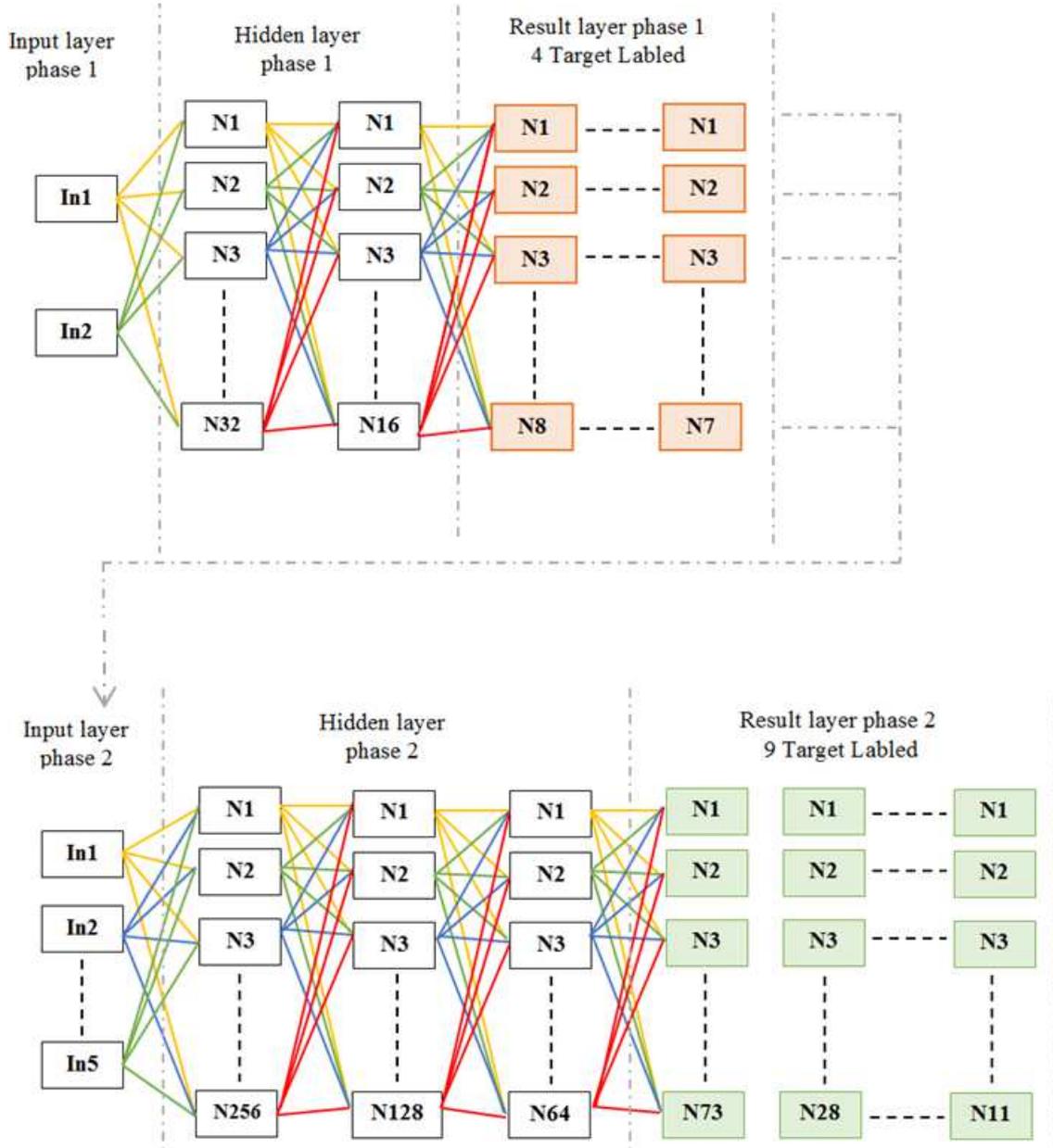


Fig. 1. Neural network architecture

Table 1. Evaluation of the accuracy of the methods used

#	Algorithm Name	MAE	MSE	RMSE	F1-score	Accuracy
1	ANN	0.0619	0.4334	0.3740	98.61%	99.32%
2	MLP	0.1993	0.9678	0.6893	92.88%	95.36%
3	Decision Tree	0.1295	0.1657	0.3897	94.51%	94.27%
4	xgboost	0.1465	0.9505	0.4933	92.31%	93.38%

## References

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326-331. – DOI 10.1007/s10556-017-0342-6. – EDN XNSPGA.
3. Санников, С. А. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 6-16. – DOI 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016. – EDN IUUWBD.
4. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364-373. – DOI 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373.
5. Альсаиди, А. А. М. Структура информационной модели кожухотрубчатого теплообменника / А. А. М. Альсаиди, В. Г. Мокрозуб // Цифровизация агропромышленного комплекса : Сборник научных статей: в 3-х томах, Тамбов, 23–25 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 85-87. – EDN FVIJSH.
6. Мокрозуб, В. Г. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника / В. Г. Мокрозуб, А. А. М. Альсаиди // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 4(54). – С. 595-606. – DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606. – EDN DNJZFN.

УДК 004.052.42

**Жуков С.В.**

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
Россия, г. Тамбов  
e-mail: i@coder-stas.ru

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОПТИМИЗАЦИИ  
ЗАГРУЗКИ ВЕБ-СТРАНИЦЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ**

**Zhukov S. V,**

Derzhavin Tambov State University, Russia, Tambov  
e-mail: i@coder-stas.ru

**MULTICRITERIA ANALYSIS OF WEB PAGE LOAD OPTIMIZATION  
METHODS AND THEIR IMPACT ON PERFORMANCE INDICATORS**

*Аннотация.* Представлен алгоритм выбора способов оптимизации загрузки веб-страниц на основе многокритериального анализа с применением метода анализа иерархий Т. Саати. Алгоритм оценки эффективности оптимизационных мероприятий учитывает серверные, сетевые и клиентские факторы, а также проводит оценку для конкретной веб-страницы. Эксперименты показали, что применение предложенного алгоритма повышает оценки Lighthouse на 87,5% для настольных и на 42,6% для мобильных устройств по сравнению со способами, подобранными методом парных сравнений.

*Ключевые слова:* веб-страницы, скорость загрузки, метод анализа иерархий, парные сравнения, Lighthouse, иерархия критериев.

*Abstract.* An algorithm for selecting web page load optimization methods based on multicriteria analysis using the Analytic Hierarchy Process (AHP) by T. Saaty is presented. The algorithm evaluates the effectiveness of optimization measures considering server, network, and client factors, as well as the characteristics of a specific web page. Experiments have shown that applying the proposed algorithm increases Lighthouse scores by 87.5% for desktop and by 42.6% for mobile devices compared to methods selected using pairwise comparisons.

*Keywords:* web pages, load speed, AHP, pairwise comparisons, Lighthouse, criteria hierarchy.

Исследования подтверждают, что даже секундная задержка при загрузке веб-страницы приводит к статистически значимому снижению конверсии [1-2], что делает оптимизацию скорости загрузки не технической, а экономической необходимостью.

Эта задача становится ещё более важной в условиях преобладания мобильного трафика и всё более строгих требований поисковых систем. Они, как отмечается в исследовании [3], учитывают скорость загрузки как один из ранжирующих факторов.

При этом сама скорость загрузки представляет собой комплексную характеристику, формируемую совокупностью факторов. На неё одновременно влияют: эффективность серверной инфраструктуры, среда передачи данных, объём и структура передаваемого контента, а также клиентские устройства. Взаимное воздействие этих элементов и разнообразие метрик их характеризующих делает невозможным выделение универсальной причины замедления скорости загрузки любого веб-ресурса.

Для того чтобы подобрать способы оптимизации веб-страницы, эффективные для конкретного веб-ресурса, нужно оценивать влияние каждого способа оптимизации на каждый элемент системы который участвует в процессе формирования веб-страницы. Для этого были выделены сущности, участвующие в процессе формирования веб-страницы и отображении её у пользователя. Для каждой сущности были определены критерии позволявшие количественно оценивать их вклад в скорость загрузки (рис. 1) и отображения контента (рис. 2).

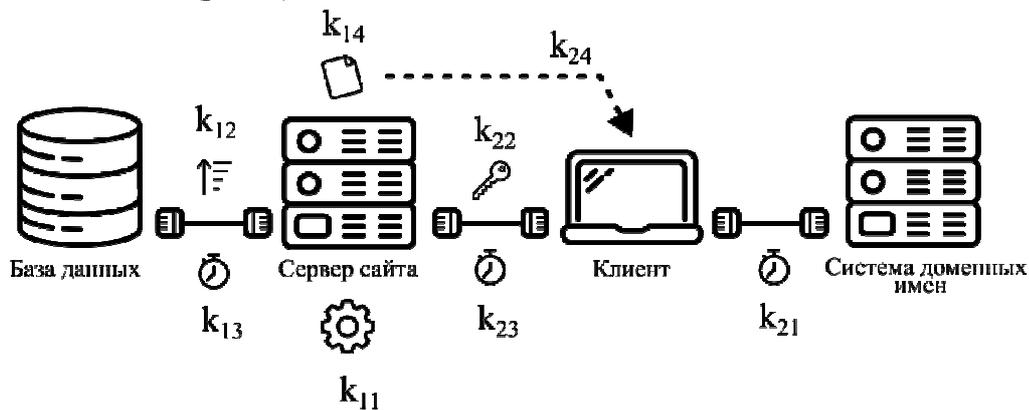


Рис. 1. Критерии серверного и сетевого уровня

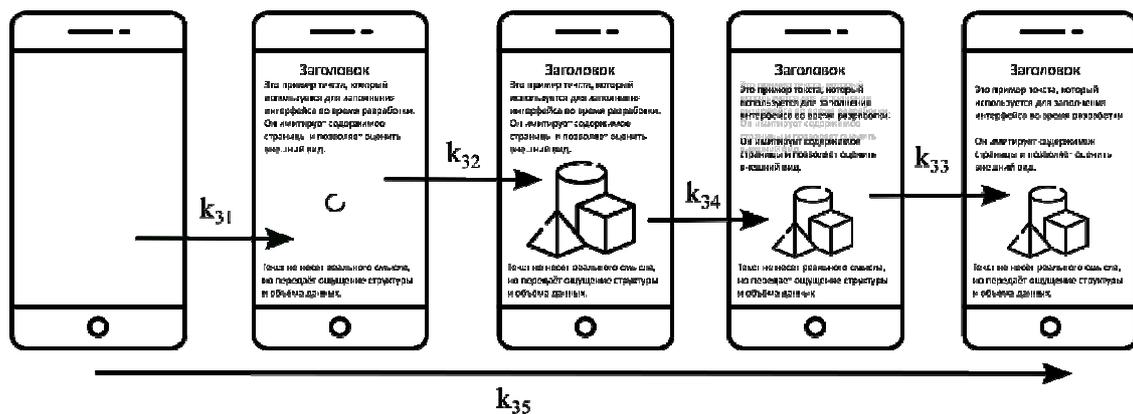


Рис. 2. Критерии клиентского уровня

Для определения значимости критериев использовался метод анализа иерархий Т. Саати. Таким образом, итоговое решение о эффективности способа оптимизации будет приниматься на основе агрегированной оценки, вычисляемой как взвешенная сумма

нормализованных изменений метрик после применения конкретного способа оптимизации. Подробнее процесс построения иерархии критериев описан в работе [4]. Сущности и их критерии были представлены в виде иерархии критериев (рис. 3).

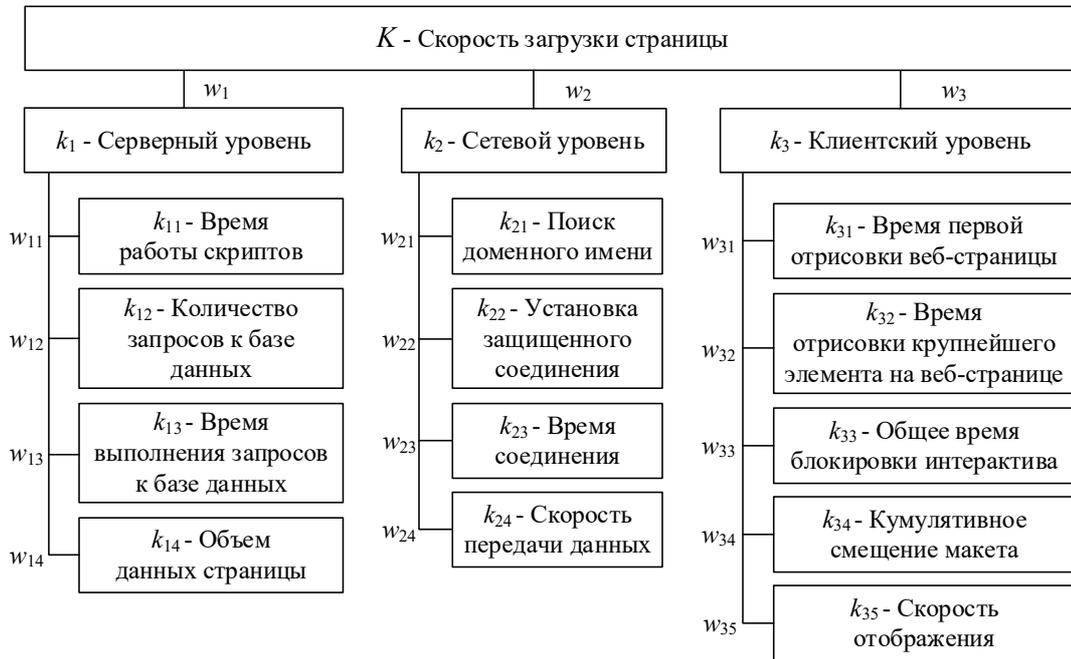


Рис. 3. Иерархия критериев

Алгоритм выбора лучших способов оптимизации включает несколько последовательных этапов. Сначала фиксируются исходные значения критериев, характеризующих скорость загрузки веб-страницы. Затем выбираются возможные оптимизационные мероприятия. После этого каждое мероприятие последовательно применяется, и выполняются повторные измерения метрик, чтобы определить изменения их значений. Полученные результаты нормализуются и сводятся в единую оценку. Далее мероприятия сравниваются по итоговым оценкам, и в качестве оптимального выбирается то, которое набрало наибольший балл. Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будут достигнуты удовлетворительные показатели скорости загрузки веб-страницы. В качестве таких показателей выбрана оценка скорости загрузки страницы по данным Lighthouse для мобильной и настольной версии от 90 баллов, а также время до получения первого байта от сервера менее чем за 240 миллисекунд.

Предложенный алгоритм поиска способов оптимизации скорости загрузки веб-страниц был сравнен с алгоритмом, предложенным в работе [5]. В ней авторы при помощи метода парных сравнений сформировали список рекомендаций, внесение которых позволяет увеличить скорость загрузки сайта. Результаты экспериментов показали, что оценки Lighthouse на 87,5% больше для настольных и на 42,6% больше для мобильных устройств, при использовании способов оптимизации, отобранных с помощью иерархии критериев, по сравнению с результатами, полученными после применения способов оптимизации подобранных на основе метода парных сравнений

(при внедрении равного количества способов оптимизации). Сравнение влияния способов оптимизации на разные страницы веб-сайтов приведено на рисунке 4.

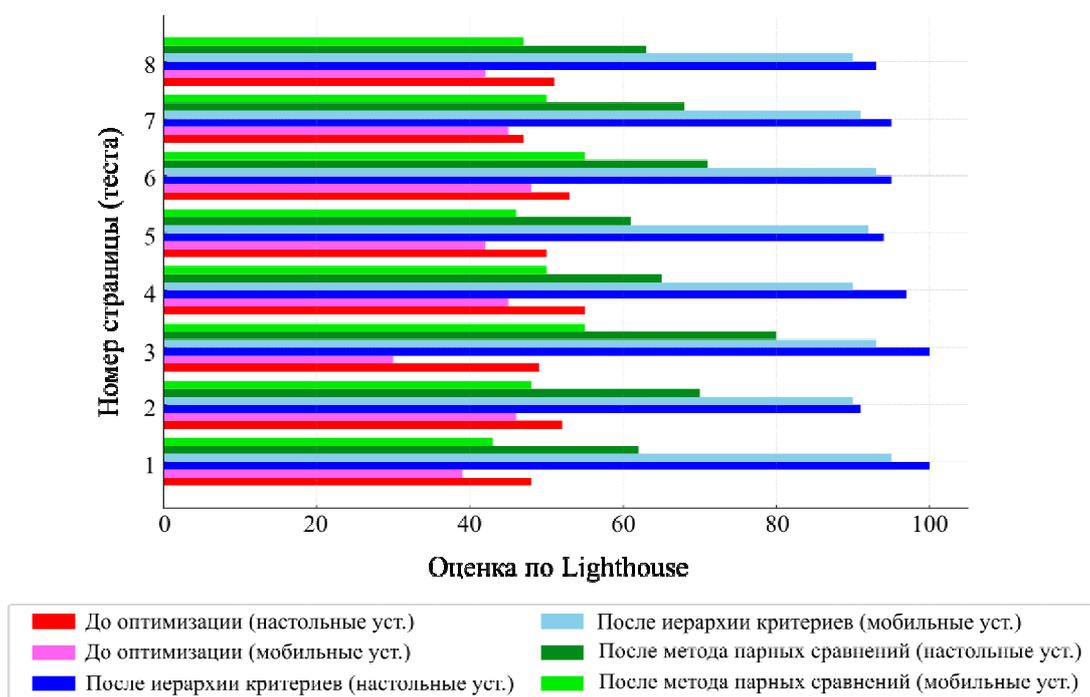


Рис. 4. Оценка скорости загрузки веб-страниц

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет выбрать оптимальные способы оптимизации скорости загрузки веб-страниц с учётом многокритериальной оценки.

#### Список использованных источников

1. Stadnik, W., Nowak, Z. The Impact of Web Pages' Load Time on the Conversion Rate of an E-Commerce Platform // *Advances in Intelligent Systems and Computing: proceedings of the International Conference on Information Systems Architecture and Technology*, September 2018. — Cham: Springer, 2018. — P. 336–345. — DOI: 10.1007/978-3-319-67220-5\_31.
2. Bansal D. How SEO Makes Website Loads Faster and Helps in User Engagement // *International Journal For Multidisciplinary Research*. — 2024. — Т. 6. — March–April 2024. — DOI 10.36948/ijfmr.2024.v06i02.15291.
3. Özkan B. Evaluating the websites of academic departments through SEO criteria: a hesitant fuzzy linguistic MCDM approach / B. Özkan, E. Özceylan, M. Kabak, M. Dağdeviren // *Artificial Intelligence Review*. — 2020. — Vol. 53, No. 2. — P. 875-905. — DOI 10.1007/s10462-019-09681-z.
4. Жуков, С. В. Многокритериальный анализ методов оптимизации веб-страниц и их влияние на ранжирование в поисковых системах / С. В. Жуков, О. А. Ковалева, С. В. Ковалев // *Информационно-управляющие системы*. — 2025. — № 4. — С. 45-57.
5. Pushkar, O., Hrabovskyi, Y., Gordyeyev, A. Development of a method for optimizing the site loading speed // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. — 2020. — № 2 (108). — С. 21–29. — DOI: 10.15587/1729-4061.2020.216993.

УДК 004.896

**Бондаренко Н.В., Соколов М.В.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г.Тамбов

e-mail: nikbon.2015@yandex.ru

## **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

**Bondarenko N.V., Sokolov M.V.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: nikbon.2015@yandex.ru

## **THE POSSIBILITIES OF USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MACHINE-BUILDING ENTERPRISES**

*Аннотация.* В статье рассмотрены проблемы современного машиностроения, для решения которых может быть использован искусственный интеллект. Представлена программа для подбора инструментов при нарезании метрической резьбы, которая в своей структуре использует нейросеть. Программа разрабатывается на языке Python.

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, нейросеть, машиностроение, программа, резьба, расчет.

*Abstract.* The article discusses the problems of modern mechanical engineering, which can be solved using artificial intelligence. A program for selecting tools for processing metric threads, which is being developed using neural networks, is presented. The program is developed in the Python programming language

*Keywords:* artificial intelligence, neural network, mechanical engineering, program, thread, calculation.

Искусственный интеллект стремительно ворвался в нашу жизнь. Еще несколько лет назад его считали фантастикой, а сегодня он доступен любому желающему. Искусственный интеллект применяют для решения многих задач – аналитика и предсказания, генерация контента, обработка естественного языка, поиск информации в интернете и многих других. В основе работы искусственного интеллекта лежат нейронные сети (нейросети) – математические модели, имитирующие работу нейронов в человеческом мозге, поэтому понятия «искусственный интеллект» и «нейросети» часто применяются синонимично. Нейросетями также называют и компьютерные программы, разработанные для решения конкретных задач и обладающие возможностью обучаться. Например, известные многим людям ChatGPT и DeepSeek являются нейросетями [1].

Нейросети уже нашли широкое применение в разных сферах жизнедеятельности человека [2, 3], однако их внедрение на предприятиях происходит медленно. Это

связано с экономическими рисками и сложностями эксплуатации и поддержки необходимого программного обеспечения. Так как ИИ является новой технологией, мало кто знает, как он устроен. Отличительной особенностью ИИ от других программ является отсутствие жесткой логики, то есть логики, написанной программистом. В процессе обучения ИИ сам находит закономерности в исходных данных, предоставленных ему разработчиками, чтобы затем использовать эти закономерности для решения поставленных задач. Поэтому применение и разработка нейросетей требуют определенных знаний и навыков.

Тем не менее, возможности применения искусственного интеллекта кажутся безграничными, и цель этой статьи – рассмотреть возможности применения ИИ на машиностроительных предприятиях.

Современные машиностроительные предприятия обладают рядом мощных инструментов для организации технологических процессов производства деталей и изделий. Различное оборудование с числовым программным управлением позволяет изготавливать высокоточные детали практически любой формы, а множество программ облегчают работу инженеров-технологов и конструкторов. Однако, это не означает отсутствие проблем [4, 5], требующих актуальных подходов к их решению. Возможно, внедрение ИИ поможет с ними справиться. К таким проблемам можно отнести:

1) Оценка загрузки оборудования. Постановка на производство новых изделий, увеличение объема выпускаемой продукции, техническое обслуживание оборудования, поломка и ремонт станков – есть множество факторов, влияющих на производство из-за которых станки могут оказаться перегруженными, то есть станки будут работать без остановки, но при этом часть деталей обрабатываться не будет, так как все оборудование занято. Или же может возникнуть обратная ситуация, когда объем производства мал и часть станков простаивает без дела.

2) Оптимизация технологических процессов. Технологии имеют свойство устаревать – когда инженер-технолог разрабатывает технологический процесс, он указывает оборудование и инструменты, необходимые для изготовления деталей. Однако оборудование изнашивается и заменяется, а поставщики инструментов меняются. При большой номенклатуре выпускаемой продукции инженеры физически не успевают отслеживать все происходящие изменения, при этом некоторые изменения требуют переработки всего технологического процесса.

3) Оптимизация режимов резания. Одним из способов изготовления металлических деталей является механическая обработка, в процессе которой с заготовки срезаются слои металла. Такая обработка имеет ряд параметров, которые различаются в зависимости от характеристик станка, инструмента, заготовки, и расчёт этих параметров необходим для получения качественных деталей в необходимом объёме с минимальными затратами времени. Расчёт режимов резания является важной и сложной задачей инженеров-технологов, которую можно было бы облегчить с применением нейросетей.

4) Анализ применяемого инструмента. Так как детали изготавливаются из разных материалов и при разных режимах обработки, для эффективной обработки должен быть подобран качественный инструмент. Иначе инструмент будет быстро изнашиваться и ломаться или не обеспечит требуемое качество поверхности обработанной детали.

Перечисленные проблемы являются актуальными для современного машиностроения, но не единственными.

Для решения последней из перечисленных проблем – анализа применяемого инструмента – разрабатывается программа, которая использует в своей структуре нейросеть. Разработка программы происходит с использованием языка программирования Python. Данная программа предназначена для определения параметров метрической резьбы и подбора необходимого инструмента для изготовления указанной резьбы. Несмотря на то, что разработка программы еще не завершена, отдельные ее элементы уже работоспособны. Например, завершена разработка блока ввода и обработки данных от пользователя. После запуска программа предлагает пользователю указать резьбу, для которой необходимо выполнить расчеты, и выводит на экран номинальный диаметр указанной резьбы, ее шаг и степень точности. Указывать можно как наружную (рис. 1), так и внутреннюю (рис. 2) резьбу.

```

Укажите тип резьбы:
[1] Наружняя
[2] Внутренняя
1
Укажите обозначение резьбы: M10x0.75-6h
Номинальный диаметр резьбы: 10.0
Шаг резьбы: 0.75
Степень точности резьбы: 6h
    
```

Рис. 1. Пример использования блока ввода данных программы для наружной метрической резьбы

```

Укажите тип резьбы:
[1] Наружняя
[2] Внутренняя
2
Укажите обозначение резьбы: M5x0.5-4H5H
Номинальный диаметр резьбы: 5.0
Шаг резьбы: 0.5
Степень точности резьбы: 4H5H
    
```

Рис. 2. Пример использования блока ввода данных программы для внутренней метрической резьбы

Вывод на экран значений номинального диаметра, шага и степени точности резьбы не является обязательным, однако именно эти три параметра подаются на вход нейронной сети, поэтому вывод параметров на экран позволяет убедиться, что программа работает корректно. Структура используемой модели нейронной сети представлена на рисунке 3. В структуре нейронной сети представлены следующие обозначения: X1, X2 – переменные, являющиеся исходными данными для нейронной сети; N1, N2, N3, N4, N5, N6 – нейроны, расположенные в трех скрытых слоях

нейросети; O1 – нейрон в «выходном» слое нейронной сети, именно он выдает результат работы нейросети; W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8, W9, W10, W11, W12, W13, W14 – так называемые «веса», показывают связи между слоями нейронами отдельно взятыми нейронами в структуре нейронной сети.

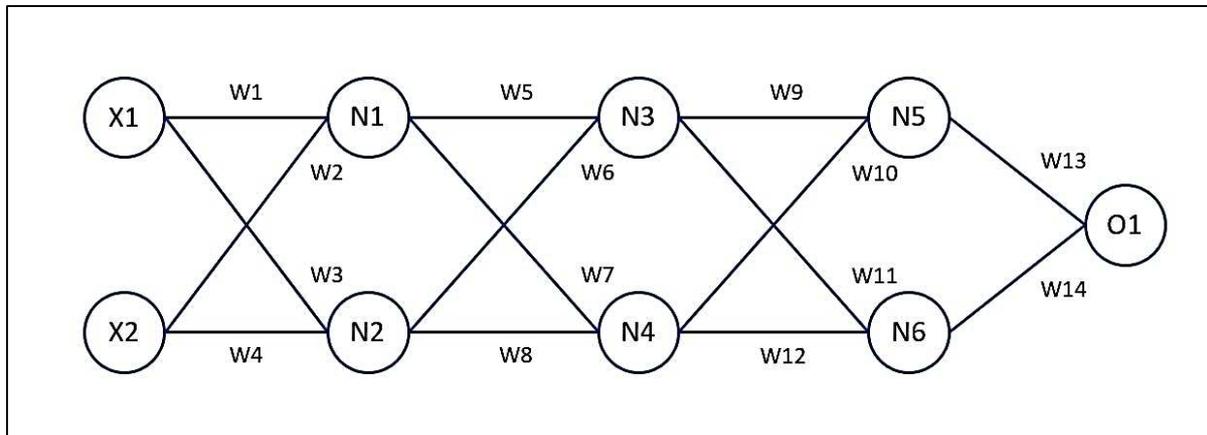


Рис. 3. Структура модели нейронной сети

Представленная модель нейронной сети должна принимать три переменные для выполнения расчётов - номинального диаметра, шага и степени точности резьбы, а результатом ее работы должен являться диаметр и допуск на него стержня или отверстия под нарезание метрической резьбы в соответствии с ГОСТ 19257-73 или ГОСТ 19258-73 в зависимости от обрабатываемой резьбы. Однако изображенная на рис.3 модель нейросети работает только с двумя переменными - номинальным диаметром и шагом резьбы. Использование этой нейросети позволило оценить работоспособность программы и получить предварительные результаты, что в свою очередь позволило внести корректировки в код программы для достижения наилучшего результата. Результат работы нейронной сети для резьб М6х0,5, М6х0,75, М10х0,75 и М5х0,5 (без указания степени точности резьбы и без указания, является ли резьба внутренней или наружной) представлен на рис.4.

Прогноз для [6. 0.5]:	5.9464
Прогноз для [6. 0.75]:	5.9321
Прогноз для [10. 0.75]:	9.9297
Прогноз для [5. 0.5]:	4.9470

Рис. 4. Результаты работы программы

Если сравнить полученные результаты с ГОСТ 19258-73, можно увидеть некоторую разницу. Для удобства, полученные данные и значение по ГОСТу, а также разница показаний сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Сравнение результатов работы программы и значений из ГОСТа

Результат программы	Значение по ГОСТу	Разница показаний
5,9464	5,94	0,0064
5,9321	5,94	-0,0079
9,9297	9,94	-0,0103
4,9470	4,94	0,007

Таким образом, следуя из данных, представленных в таблице 1, погрешность результата работы нейронной сети находится в районе от -0,0103 до 0,007. Учитывая, что используемая нейросеть является довольно простой и применялась в рамках эксперимента, результат можно считать хорошим.

Разработка программы продолжается и для достижения оптимальных результатов будут меняться параметры и структура нейронной сети, а также будет разработан блок подбора инструментов и база данных инструментов. Главным промежуточным итогом при разработке представленной программы является доказательство возможности применения нейронных сетей для решения некоторых задач в машиностроении.

Искусственному интеллекту еще предстоит долгий путь совершенствования, но его возможности впечатляют уже сейчас. Грамотное применение ИИ в промышленности позволит сократить затраты на производство, оптимизировать технологические процессы, ускорить производство и автоматизировать многие процессы. Разрабатываемая программа может стать частью «умного производства» - такого типа производства, когда большую часть работы выполняют машины под наблюдением информационных систем, в том числе с использованием искусственного интеллекта.

#### Список использованных источников

1. ChatGPT для начинающих: Разбираемся, как это работает. Просто о сложном. [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://habr.com/ru/articles/882310/> (Дата обращения: 15.09.2025)
2. В Китае рассказали, как технологии распознавания лиц помогают полиции. [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://ria.ru/amp/20190517/1553564055.html?ysclid=m9pzowl64s886181252> (Дата обращения: 15.09.2025)
3. Мохан Пракаш Б., Шрихариприя К.Ч., Усовершенствованная система обнаружения выбоин с использованием алгоритма YOLOX. [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43684-022-00037-z> (Дата обращения: 15.09.2025)
4. Автоматизация производства [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://www.exponent.ru/ru/articles-of-exhibitions/2016/avtomatizaciya-proizvodstva/?ysclid=m6mklv075543084715> (Дата обращения: 15.09.2025)
5. Автоматизация производственных процессов [Электронный ресурс] // Data Start URL: <https://bercut.com/blog/technologies/avtomatizatsiya-proizvodstvennykh-protsessov/?ysclid=m6gw3o1pox76874985> (Дата обращения: 15.09.2025)
6. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

УДК 678.028.31

**Скоморохова А. И., Глебов А. О.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: nasta373@mail.ru

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

**Skomorokhova A. I., Glebov A. O.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: nasta373@mail.ru

## **OPTIMIZATION OF THE OPERATING PARAMETERS OF THE VULCANIZATION PROCESS FOR RUBBER PRODUCTS**

*Аннотация.* Предложена методика определения оптимальных режимных параметров процесса вулканизации. Разработан программный модуль для системы конечно-элементного анализа ANSYS 2019 R2, позволяющий оценить протекание вулканизации: от разогрева плит прессы в режиме автоматического ПИД-регулирования температуры до остывания резинотехнического изделия после его извлечения из пресс-формы.

*Ключевые слова:* резинотехнические изделия, степень вулканизации, кинетика, моделирование.

*Abstract.* A method for determining the optimal operating parameters of the vulcanization process is proposed. A software module has been developed for the ANSYS 2019 R2 finite element analysis system, which makes it possible to evaluate the course of vulcanization: from heating the press plates in the automatic PID temperature control mode to cooling the rubber product after it is removed from the mold.

*Keywords:* rubber products, state of cure, kinetics, modeling.

Совершенствование процессов производства изделий различного назначения является важной задачей для развития отечественной промышленности [1]. При производстве изделий из резины наиболее важным и энергозатратным этапом является вулканизация. В результате вулканизации сырая резиновая смесь приобретает форму и эксплуатационные характеристики готового продукта. В данной работе рассматривается вопрос оптимизации режимных параметров процесса вулканизации методом компрессионного формования на примере реальных изделий.

Основными режимными параметрами процесса вулканизации являются температура нагрева и время выдержки резиновой смеси в пресс-форме. На предприятиях данные параметры определяют экспериментально, что значительно увеличивает время на освоение новой продукции. По этой причине многие

современные ученые занимаются разработкой подходов к определению наилучшего сочетания режимных параметров посредством вычислительных экспериментов [2, 3]. Как правило, в исследованиях используются различные пакеты программ, позволяющие рассчитать кинетику вулканизации и определить время достижения степени вулканизации 0,9 по всему объему резиновой смеси.

Теоретические расчеты степени вулканизации основываются на различных математических моделях. Наиболее универсальными представляются модели, учитывающие три стадии вулканизации: индукционный период, вулканизацию, реверсию. К такой модели относится предложенный корейскими учеными в 1998 году подход, согласно которому процесс вулканизации представляется как совокупность трех реакций первого порядка: образование стабильных связей каучука с серой, образование нестабильных связей, разрушение нестабильных связей [4].

Период индукции описывается выражением:

$$\bar{t} = \int_0^t \frac{dt}{t_0 e^{E_{\text{ind}} / RT}}, \quad (1)$$

где  $\bar{t}$  – безразмерное время, которое принимает значение 1, когда заканчивается индукционный период и начинается вулканизация;  $t_0$  – предэкспоненциальный множитель периода индукции, с<sup>-1</sup>;  $E_{\text{ind}}$  – энергия активации периода индукции, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Период вулканизации описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\bar{S}}{dt} = -(k_1 + k_2)\bar{S}; \quad (2)$$

$$\frac{d\alpha_1}{dt} = k_1\bar{S}; \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha_2}{dt} = k_2\bar{S} - k_3\alpha_2; \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2; \quad (5)$$

$$\bar{S}(0) = 1; \quad \alpha_1(0) = 0; \quad \alpha_2(0) = 0, \quad (6)$$

где  $\bar{S}$  – доля серы, доступной для образования связей;  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_3$  – константы скоростей трех реакций;  $\alpha$  – глобальная степень вулканизации;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – степени вулканизации, соответствующие реакциям образования стабильных и нестабильных связей.

Константы скоростей реакций определяются уравнением Аррениуса:

$$k_i = A_i e^{(-E_i / RT)}, \quad i=1, 2, 3, \quad (7)$$

где  $A_i$  – предэкспоненциальный множитель  $i$ -й реакции, с<sup>-1</sup>;  $E_i$  – энергия активации  $i$ -й реакции, Дж/моль.

Описанный подход используется в данной работе для расчета кинетики вулканизации в системе конечно-элементного анализа ANSYS 2019 R2. Для этого необходимо определить кинетические параметры  $t_0$ ,  $E_{\text{ind}}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ . Их расчет осуществляется по разработанному алгоритму, представленному в работе [5].

Далее с использованием разработанного программного модуля выполняется расчет степени вулканизации по алгоритму, показанному на рис. 1.

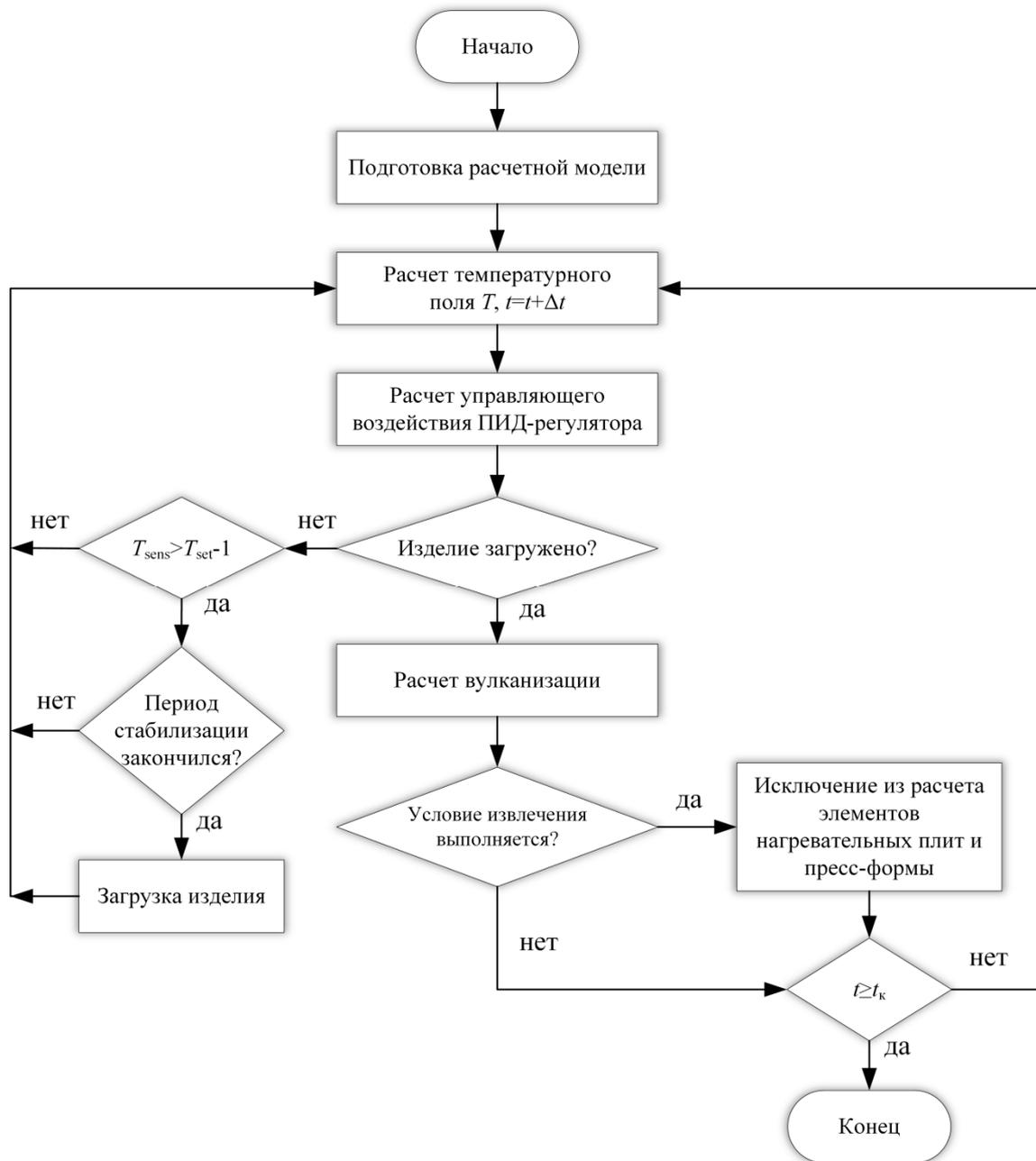


Рис.1. Блок-схема алгоритма моделирования процесса вулканизации

Варьируемыми параметрами являются температура уставки контрольной термопары  $T_{set}$  и время выдержки резиновой смеси в пресс-форме  $t_v$ . Постановку задачи оптимизации можно сформулировать следующим образом. Необходимо найти такие температуру уставки контрольной термопары  $T_{set}$  и минимальное время выдержки резиновой смеси в пресс-форме  $t_v$ , при которых обеспечивается ограничение на минимальную степень вулканизации по всему объему готового изделия:

$$t_v \rightarrow \min ; \quad (8)$$

$$\varphi(t_v, T_{set}) = \alpha_{\min}(t_v, T_{set}) - \alpha_{\text{opt}} > 0, \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{opt}}$  – степень вулканизации, при которой свойства изделия будут соответствовать требуемым эксплуатационным характеристикам.

Оптимизацию режимных параметров вулканизации предлагается осуществлять в 4 этапа:

1) расчет кинетики вулканизации при различных температурах с условием извлечения изделия из пресс-формы по достижении среднего значения степени вулканизации во всем объеме резиновой смеси 0,9;

2) графическое определение оптимальной температуры, при которой функция ограничения  $\varphi$  максимальна;

2) проведение расчетов при оптимальной температуре нагрева с различным временем выдержки резиновой смеси в пресс-форме;

4) графическое определение оптимального времени выдержки, при котором  $\varphi=0$ .

В качестве примера выполним оптимизацию режимных параметров изделия, показанного на рис. 2.

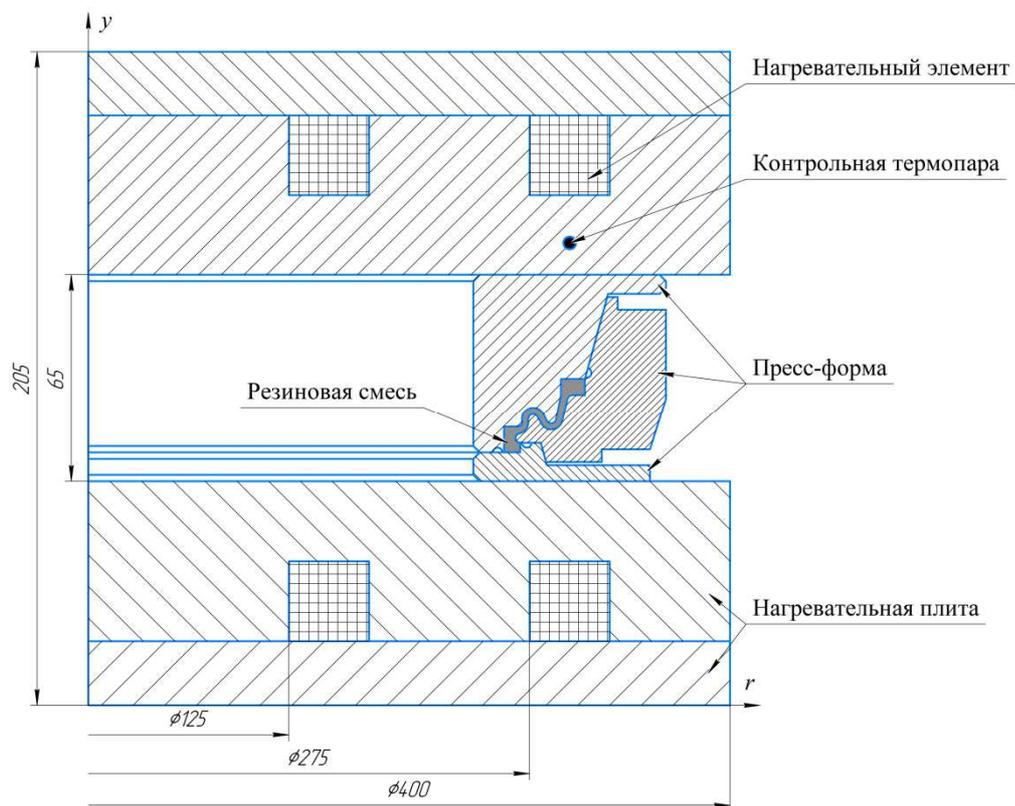


Рис. 2. Эскиз расчетной модели

На первом этапе оптимизации получен график (рис. 3а), из которого видно, что оптимальной для данного изделия является температура уставки контрольной термодпары 155°C.

Далее при температуре 155°C было выполнено два расчета для определения оптимального времени выдержки резиновой смеси в пресс-форме (рис. 3б), которое составило 470 с.

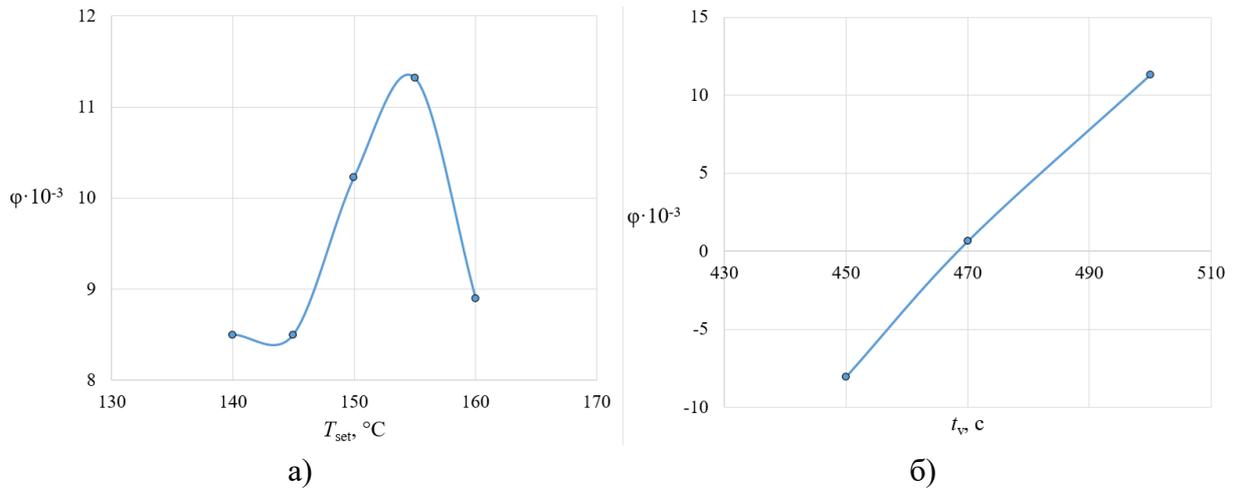


Рис.3. Графическое определение оптимальных режимных параметров: а) температуры уставки; б) времени выдержки

С использованием разработанного программного модуля [6] в результате расчета построено поле степени вулканизации после извлечения изделия из пресс-формы и достижения температуры 30 °С (см. рис. 4).

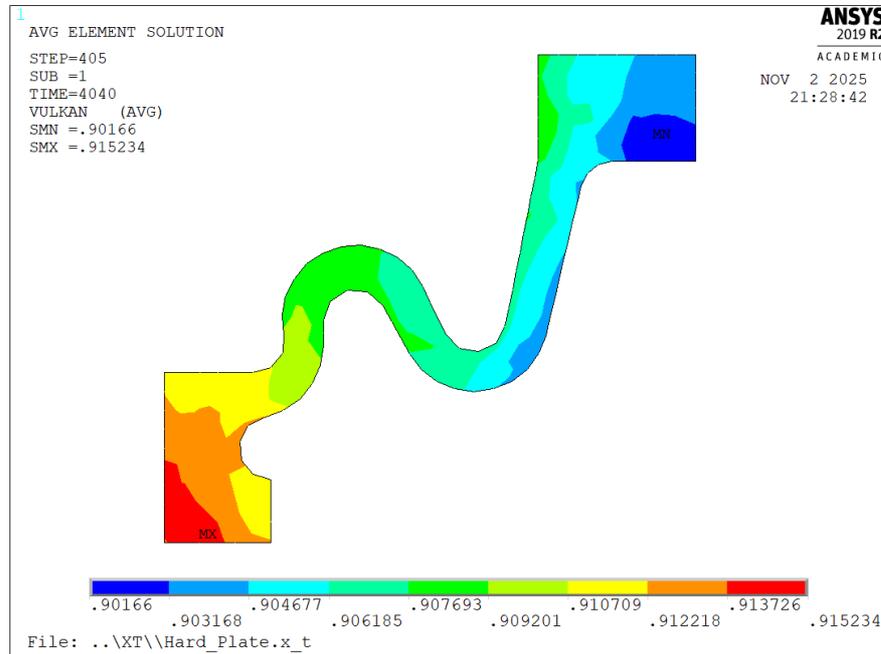


Рис. 4. Поле степени вулканизации

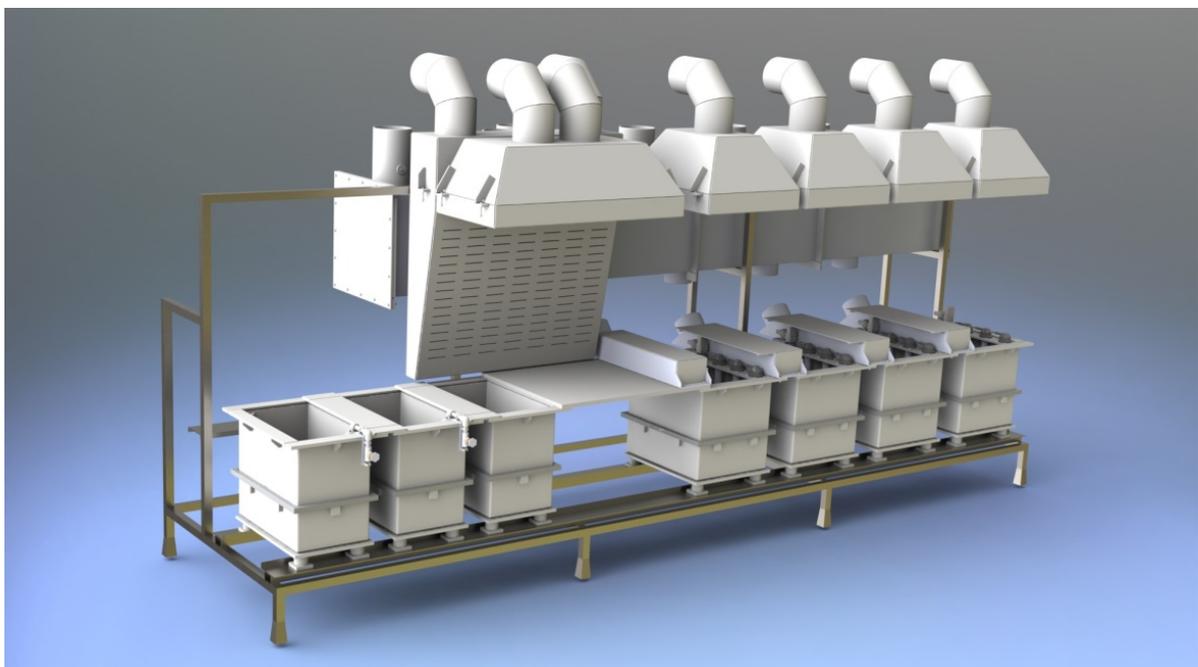
Таким образом, в статье сформулирована постановка задачи оптимизации режимных параметров процесса вулканизации по критерию времени выдержки резиновой смеси в пресс-форме с ограничением на минимальную степень вулканизации по всему объему готового изделия. Предложена оригинальная методика оптимизации.

Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с.
2. A novel approach for simulation and optimization of rubber vulcanization / J. Lubura [et al.] // *Polymers*. – 2023. – Т. 15. – №. 7. – С. 1750.
3. Расчет степени завершенности процесса вулканизации на примере многослойных резиновых изделий для тяжелой промышленности / С. Г. Тихомиров [и др.] // *Инженерные технологии*. – 2025. – № 2(10). – С. 69-79.
4. A kinetic model of reversion type cure for rubber compounds / I.S. Han [et al.] // *Jung, Polym. Korea*. – 1998. – Т. 22. – № 2. – С. 223–230.
5. Скоморохова, А.И. Алгоритм расчета параметров кинетических уравнений процесса вулканизации резиновых смесей / А.И. Скоморохова, А.О. Глебов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2025. – Т. 31. – № 3. – С. 411-424. DOI: 10.17277/vestnik.2023.03.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025614332 Российская Федерация. Модуль расчета степени вулканизации резинотехнических изделий произвольной формы для системы ANSYS: № 2025611442: заявл. 30.01.2025; опубл. 20.02.2025 / А. И. Скоморохова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет».

## Секция

### ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



УДК 536.2

**Губарева К. В.**

Самарский государственный технический университет, Россия, г. Самара

e-mail: r.kristina2017@mail.ru

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
В ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ ТИПА SCHOEN'S BATWING С УЧЁТОМ  
ДИССИПАТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ**

**Gubareva K. V.**

Samara State Technical University, Russia, Samara

e-mail: r.kristina2017@mail.ru

**NUMERICAL INVESTIGATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A  
POROUS STRUCTURE OF SCHOEN'S BATWING TYPE WITH ACCOUNT FOR  
DISSIPATIVE EFFECTS**

*Аннотация.* В данной работе представлено численное исследование температурного поля в пористой структуре типа Schoen's Batwing – одной из трижды периодических минимальных поверхностей, обладающей высокой степенью симметрии и равномерным распределением пор. Моделирование выполнено с учётом диссипации энергии, возникающей при течении теплоносителя через узкие каналы структуры. Рассматривается стационарный одномерный поток, при котором на входе задаётся постоянная температура, а на выходе – условие свободного истечения. Уравнение энергии решается методом конечных элементов с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Полученные результаты показывают значительное влияние геометрических параметров ячейки и диссипативных эффектов на распределение температуры по длине канала. Исследование имеет практическое значение для проектирования компактных теплообменников, систем охлаждения и химических реакторов с развитой поверхностью.

*Ключевые слова:* пористая структура, Schoen's Batwing, численное моделирование, температурное поле, диссипация энергии, минимальные поверхности, теплоперенос.

*Abstract.* This paper presents a numerical study of the temperature field in a porous structure of the Schoen's Batwing type – one of the triply periodic minimal surfaces (TPMS) characterized by high symmetry and uniform pore distribution. The simulation accounts for energy dissipation arising from fluid flow through the structure's narrow channels. A steady-state unidirectional flow is considered, with a constant temperature prescribed at the inlet and a free outflow condition at the outlet. The energy equation is solved using the finite element method implemented in COMSOL Multiphysics. The results demonstrate a significant influence of the geometric cell parameters and dissipative effects on the temperature distribution along the channel. The study is relevant for the design of compact heat exchangers, cooling systems, and reactors with high surface area density.

*Keywords:* porous structure, Schoen's Batwing, numerical simulation, temperature field, energy dissipation, minimal surfaces, heat transfer.

Пористые материалы с регулярной внутренней структурой находят всё более широкое применение в инженерных задачах, связанных с тепло- и массопереносом [1]. Особый интерес представляют трижды периодические минимальные поверхности (TPMS) [2], такие как Schoen's Batwing, благодаря их уникальным топологическим свойствам: высокой удельной площади поверхности, равномерному распределению пор и отсутствию застойных зон. Эти характеристики делают TPMS-структуры перспективными для использования в теплообменных аппаратах, каталитических реакторах и системах охлаждения электроники.

В настоящей работе рассматривается задача определения температурного поля в канале, образованном структурой Schoen's Batwing (рис. 1), при протекании через него теплоносителя. Цель работы – оценка влияния геометрических параметров ячейки и диссипативных эффектов на распределение температуры вдоль канала.

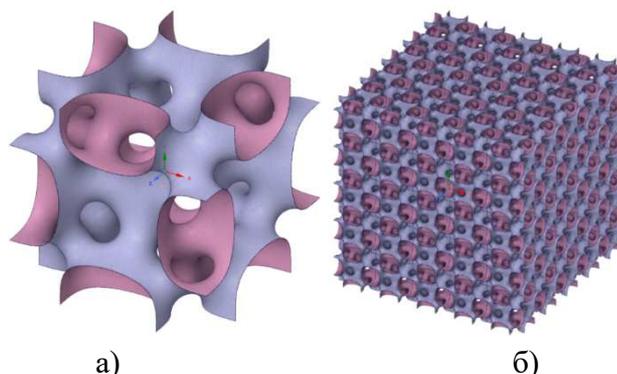


Рис. 1. Трижды периодическая минимальная поверхность:  
а) элементарная ячейка; б) пористый материал

Температурное поле в пористой структуре описывается уравнением энергии с источником, обусловленным диссипацией:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{diss},$$

где  $T$  – температура,  $\rho$  – плотность,  $c_p$  – удельная теплоёмкость,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $Q_{diss}$  – объёмная мощность диссипативного тепловыделения.

В рамках стационарного режима ( $\partial T / \partial t = 0$ ) уравнение принимает вид:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{diss} = 0.$$

Диссипация энергии моделируется как функция скорости потока и вязкости. Для ламинарного течения вязкая диссипация описывается выражением:

$$Q_{diss} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2,$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость,  $u_i$  – компоненты скорости.

Граничные условия задаются следующим образом: на входе в канал:  $T = T_0 = const$ , на стенках структуры:  $\partial T / \partial n = 0$  (адиабатические стенки), на выходе из канала:  $\partial T / \partial x = 0$  (условие свободного истечения).

Численное решение проводится методом конечных элементов в ПК COMSOL Multiphysics [3]. Геометрия ячейки Schoen's Batwing воспроизводится с использованием аналитического выражения для минимальной поверхности, соответствующей типу Batwing. Размеры ячейки и гидравлические параметры задаются: средний гидравлический диаметр – 0.0019964 м, площадь входного сечения – 0.0001077 м<sup>2</sup>, количество входов – 4. Расчётная область представляет собой фрагмент структуры длиной в несколько ячеек, что позволяет исключить влияние краевых эффектов.

Расчёт выполнен для стационарного режима при входной температуре  $T_0 = 300$  К и скорости потока 0.1 м/с. Коэффициент теплопроводности материала принят равным 20 Вт/(м·К), динамическая вязкость жидкости – 0.001 Па·с. Результаты показывают, что температура в канале возрастает в направлении движения потока из-за диссипации энергии. Наибольший температурный подъём наблюдается в узких сечениях, где скорость максимальна, а градиенты скорости наиболее резкие.

Средняя температура на выходе превышает входную на 2.8 К, что свидетельствует о значительном вкладе диссипации. При увеличении скорости потока до 0.5 м/с перепад температур возрастает до 14.2 К. Анализ также показал, что изменение диаметра ячейки или площади сечения оказывает нелинейное влияние на температурное поле: уменьшение диаметра на 10% приводит к росту температуры на выходе на 35%, что связано с увеличением градиентов скорости и, соответственно, мощности диссипации.

Проведённое исследование позволило установить, что температурное поле в пористой структуре существенно зависит от геометрических параметров ячейки и скорости потока. Диссипация энергии, обусловленная вязким трением, играет ключевую роль в формировании температурного распределения, особенно в узких каналах. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации конструкции теплообменников на основе TPMS-структур, позволяя прогнозировать температурные режимы и избегать перегрева при высоких скоростях потока.

*Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект №23-79-10044, <https://rscf.ru/project/23-79-10044/>).*

#### Список использованных источников

1. Gubareva, K. V. Studying the heat transfer process in a porous medium with a Fischer–Koch S TPMS structure / K.V. Gubareva, A.V. Eremin // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2024. – Iss. 4. – P. 70 – 82. – DOI: 10.17804/2410-9908.2024.4.070-082.
2. Губарева, К. В. Моделирование процесса теплопроводности в пористой среде с переменными во времени граничными условиями / К. В. Губарева, А. В. Еремин // *Тепловые процессы в технике*. – 2025. – Т. 17, № 4. – С. 151-160. – EDN IMXMCX.
3. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформаций в сплошных средах / В. Е. Анкудинов, Д. Д. Афлятунова, М. Д. Кривилев, Г. А. Гордеев. – Ижевск: Удмуртский государственный университет, 2014. – 107 с. – ISBN 978-5-4312-0312-1. – EDN VBZYDP.

УДК 519.873

**Карпушкин С.В.<sup>1</sup>, Джураев Б.Ш.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: karp@mail.tstu.ru

<sup>2</sup>e-mail: dzhurayevb@mail.ru

**ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЕМКОСТНЫХ АППАРАТАХ**

**Karpushkin S.V.<sup>1</sup>, Dzhuraev B.Sh.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: karp@mail.tstu.ru

<sup>2</sup>e-mail: dzhurayevb@mail.ru

**CHECKING ADEQUACY THE MATHEMATICAL MODEL OF  
MECHANICAL MIXING IN CAPACITY APPARATUS**

*Аннотация.* Предложена методика проверки адекватности математической модели процесса механического перемешивания (ПМП) в вертикальных емкостных аппаратах, разработанной на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и RNG k-ε модели турбулентности. Методика предусматривает расчет значений затрат мощности на перемешивание по результатам решения модели и результатам измерений напряжения питания и силы тока, потребляемого электродвигателем привода мешалки емкостного аппарата, при перемешивании гомогенной жидкости и вращении мешалки в пустом аппарате.

Представлены результаты сравнения значений затрат мощности на перемешивание, рассчитанных по результатам решения математической модели ПМП, по методике, рекомендованной НИИХИММАШ, и по результатам экспериментов на промышленном аппарате.

*Ключевые слова:* вертикальные емкостные аппараты, механическое перемешивание, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности, адекватность результатам эксперимента.

*Abstract.* A methodology for validating a mathematical model of the mechanical mixing process (MMP) in vertical tank vessels is proposed. The model is based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the RNG k-ε turbulence model. The methodology involves calculating mixing power consumption based on the model's solution and measurements of the supply voltage and current consumed by the tank vessel's stirrer drive motor during mixing of a homogeneous liquid and stirring in an empty vessel.

A comparison of mixing power consumption values calculated based on the solution of the MMP mathematical model, the methodology, recommended by NIIKhIMMASH, and experimental results on an industrial vessel is presented.

*Keywords:* vertical capacitive devices, mechanical mixing, Navier-Stokes equations, turbulence model, adequacy to experimental results.

В публикациях [1,2] предложена методика оптимизации процесса механического перемешивания (ПМП) жидкости в вертикальной емкости, включающая математическую модель ПМП, постановку задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механических перемешивающих устройств (МПУ) вертикальных емкостных аппаратов и алгоритм ее решения. Основными параметрами конструкции МПУ являются диаметр мешалки  $D_m$ , ширина ее лопасти  $H_m$  и высота установки над днищем аппарата  $h_{hm}$ . Режим функционирования МПУ характеризуется частотой вращения вала мешалки  $n$ .

Исследуется установившееся движение гомогенной жидкости в вертикальной цилиндрической емкости, поэтому разработанная математическая модель ПМП включает осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные полуэмпирической RNG  $k$ - $\varepsilon$  моделью турбулентности, в цилиндрической системе координат.

При ее разработке приняты допущения об изотермичности ПМП и о симметричности поля скоростей перемешиваемой жидкости относительно оси вращения мешалки, совпадающей с вертикальной осью симметрии емкостного аппарата. Как следствие, моделируется двумерное поле скоростей перемешиваемой жидкости (по высоте  $l$  и радиусу  $r$  аппарата). Для решения разработанной математической модели ПМП использовалась кросс-компилированная версия BlueCFD (Computational Fluid Dynamics) свободно распространяемого комплекса программ конечно-элементного анализа OpenFOAM [3].

Данная работа посвящена описанию модификаций рассмотренной в [2] процедуры проверки адекватности модели и сравнения значений затрат мощности на перемешивание, рассчитанных по результатам решения модели, по методике, рекомендованной НИИХИММАШ [4], и по результатам экспериментов на промышленном аппарате.

В [1,2] предлагается проверять адекватность математической модели ПМП сравнением значений затрат мощности на перемешивание ( $N$ ), рассчитанных по результатам решения модели, измерений напряжения питания и силы тока, потребляемого электродвигателем привода мешалки лабораторного аппарата, при перемешивании гомогенной жидкости ( $U_{ж}$  и  $I_{ж}$ ) и вращении мешалки в пустом аппарате ( $U_{п}$  и  $I_{п}$ ).

Значения  $N$  рассчитываются по найденным в результате решения модели значениям компонент вектора скорости перемешиваемой жидкости по высоте и радиусу аппарата  $\bar{u}_{li}, \bar{u}_{ri}$ ,  $i = 1, \dots, z$ , где  $z$  – число конечных элементов (КЭ), сформированных в объеме перемешиваемой жидкости, следующим образом:

$$N = M_{кр} \cdot 2\pi n, \quad (1)$$

где  $M_{кр} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z F_{вти} \cdot r_i$  – осредненный крутящий момент, необходимый для преодоления

сил внутреннего трения в перемешиваемой жидкости;

$r_i$  – радиус расположения  $i$ -го КЭ, м;

$F_{вти} = \mu_{eff} \cdot grad(\bar{u}_i) \cdot s_i$  – сила внутреннего трения в  $i$ -м КЭ, Н;

$s_i$  – поверхность соприкосновения  $i$ -го КЭ с соседним по радиусу аппарата, м<sup>2</sup>;

$grad(\bar{u}_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial l}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial l}\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial r}\right)^2}$  – длина градиента скорости жидкости в  $i$ -

м КЭ.

Расчет затрат мощности на перемешивание в лабораторном аппарате, оснащённом электродвигателем постоянного тока, производился по формуле [5]:

$$N = \frac{I_{ж} \cdot U_{ж} - I_{п} \cdot U_{п}}{K_{п}} \quad (2)$$

где  $K_{п}$  – коэффициент пусковых перегрузок значения которого принимались согласно рекомендациям [4].

Отклонение значений  $N$ , рассчитанных по (1) и согласно (2), для лопастной, турбинной открытой и трехлопастной мешалок, поочередно устанавливаемых в лабораторном аппарате емкостью 0.04 м<sup>3</sup>, не превышает 5%, см. [2]. Отмечены существенные отличия результатов расчетов значений затрат мощности на перемешивание по методике, рекомендуемой [4], от результатов экспериментов и расчетов по (1),(2).



Рис. 1. Промышленный аппарат для проведения экспериментов

Для подтверждения адекватности математической модели ПМП проведена серия экспериментов на промышленном аппарате ВЭЭ2–3–0,63–0,6 У, см. рис. 1, объемом 0.63 м<sup>3</sup>, диаметром корпуса  $D_r = 1$  м и высотой  $H_r = 0.875$  м, открытая турбинная мешалка которого, установленная на высоте  $h_{hm} = 0.22$  м от дна, имеет диаметр  $D_m = 0.25$  м, ширину лопасти  $H_m = 0.12$  м. Аппарат заполнялся 0.47 м<sup>3</sup> артезианской воды, подогретой до температуры 20 °С, плотностью 1027 кг/м<sup>3</sup>, кинематической вязкостью  $1.006 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Отличие экспериментов на промышленном аппарате от лабораторного – использование привода МПУ, оснащённого электродвигателем переменного тока с короткозамкнутым ротором. Номинальное напряжение питания двигателя 380 В, номинальная частота вращения ротора 750 1/мин, номинальный

ток 2.4 А, коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0.6$ , мощность 550 Вт. Расчет затрат мощности производился по формуле [5]:

$$N = \frac{\sqrt{3} \cdot (I_{\text{ж}} \cdot U_{\text{ж}} - I_{\text{п}} \cdot U_{\text{п}}) \cdot \cos\varphi}{K_{\text{п}}} \quad (3)$$

Аппарат, представленный на рис. 1, функционирует в одном из цехов АО «Пигмент», г. Тамбов, поэтому изменения типа и геометрии мешалки были невозможны. Частота ее вращения изменялась с применением частотного преобразователя от 100 до 360 1/мин с шагом 20 1/мин.

Таблица 1. Результаты расчетов затрат мощности на перемешивание

Частота вращения мешалки, 1/мин	Значение $N$ , рассчитанное по (1), Вт	Значение $N$ , рассчитанное по (3), Вт	Значение $N$ , рассчитанное согласно [4], Вт
100	6,316	6,188	7,430
120	7,016	6,978	12,045
140	9,067	8,953	18,129
160	10,95	10,719	25,841
180	11,834	11,719	35,333
200	15,873	15,928	46,751
220	18,353	18,030	60,237
240	19,575	19,082	75,926
260	21,391	21,189	93,952
280	30,444	30,800	114,444
300	36,503	35,543	137,528
320	42,197	41,202	163,329
340	50,461	49,760	191,966
360	53,149	52,262	223,559

В табл. 1 сведены значения затрат мощности на перемешивание, рассчитанные по (1), согласно (3) по результатам измерений значений  $U_{\text{ж}}$  и  $I_{\text{ж}}$ ,  $U_{\text{п}}$  и  $I_{\text{п}}$ , а также по методике, рекомендуемой [4]. Сравнение результатов расчетов значений  $N$  по (1) и по (3) подтверждает адекватность используемой модели ПМП: отклонение не превышает 3%.

Заметим, что результаты расчетов значений затрат мощности на перемешивание открытой турбинной мешалкой согласно [4] существенно превышают результаты расчетов согласно (1),(3): при  $n = 360$  1/мин более, чем на 400%.

Список использованных источников

1. Мартьянов, Е.И. Оптимизация процесса перемешивания жидкости в вертикальных емкостных аппаратах с механическими перемешивающими устройствами / Е.И. Мартьянов, С.В. Карпушкин // Вестник Тамбовского ГТУ. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 280-293.
2. Карпушкин, С.В. Оптимизация параметров механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С.В. Карпушкин, Е.И. Мартьянов // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 6. – С. 41-48.
3. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
4. OpenFOAM – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fsweb.info/caesad/openfoam.html> (дата обращения: 10.06.2024).
5. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85: Механические перемешивающие устройства, метод расчета; Введ. с 01.01.1986. – Л.: РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.
6. Скорняков, В.А. Общая электротехника и электроника: учебник для вузов / В.А. Скорняков, В.Я. Фролов. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 176 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/156932> (дата обращения: 03.06.2024).

УДК 519.873

**Карпушкин С.В.<sup>1</sup>, Мартьянов Е.И.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: karp@mail.tstu.ru

<sup>2</sup>e-mail: martyanovjeka@yandex.ru

**КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО  
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ЕМКОСТНОМ  
АППАРАТЕ**

**Karpushkin S.V.<sup>1</sup>, Martyanov E.I.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: karp@mail.tstu.ru

<sup>2</sup>e-mail: martyanovjeka@yandex.ru

**A SET OF PROGRAMS FOR OPTIMIZING THE PROCESS OF LIQUID'S  
MECHANICAL MIXING IN A VERTICAL CAPACITY APPARATUS**

*Аннотация.* Рассматривается структура и функции комплекса программ, реализующего методику оптимизации процесса механического перемешивания (ПМП) однородной жидкости в вертикальном емкостном аппарате, которая включает:

- математическую модель ПМП, разработанную на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса и RNG k-ε модели турбулентности;
- постановку задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механических перемешивающих устройств (МПУ) с точки зрения дисперсии вектора скорости перемешиваемой жидкости;
- алгоритм решения задачи оптимизации, разработанный на основе теории многофакторного вычислительного эксперимента.

Представлены результаты сравнения эффективности разработанного комплекса программ с популярными системами инженерного анализа, его применения для модификации параметров МПУ промышленного аппарата АО «Пигмент», г. Тамбов.

*Ключевые слова:* оптимизация процесса механического перемешивания, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности, равномерность поля скоростей перемешиваемой жидкости, вычислительный эксперимент, комплекс программ.

*Abstract.* The article discusses the structure and functions of a software package implementing a method for optimizing the mechanical mixing process (MMP) of a homogeneous liquid in a vertical tank apparatus, which includes:

- a mathematical model of the MMP, developed on the basis of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the RNG k-ε turbulence model;

- formulation the problem of optimizing the design parameters and operating mode of mechanical mixing devices (MMD) from the point of view the velocity vector's dispersion of the mixed liquid;

- an algorithm for solving the optimization problem, developed on the basis of the multifactorial computational experiment's theory.

The results of comparison the developed software package's efficiency with popular engineering analysis systems, its application for parameters' modification of the MMD within industrial apparatus of JSC Pigment, Tambov, are presented.

*Keywords:* optimization of the mechanical mixing process, Navier-Stokes equations, turbulence model, uniformity of the velocity field of the mixed liquid, computational experiment, software package.

В публикациях [1,2] нами предложена методика оптимизации процесса механического перемешивания (ПМП) жидкости в вертикальной емкости, включающая математическую модель ПМП, постановку задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования механических перемешивающих устройств (МПУ) вертикальных емкостных аппаратов и алгоритм ее решения.

Основными параметрами конструкции МПУ являются диаметр мешалки  $D_m$ , ширина ее лопасти  $H_m$  и высота установки над днищем аппарата  $h_{hm}$ . Режим функционирования МПУ характеризуется частотой вращения вала мешалки  $n$ .

Исследуется установившееся движение гомогенной жидкости в вертикальной цилиндрической емкости, поэтому разработанная математическая модель ПМП включает осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, дополненные полуэмпирической RNG k-ε моделью турбулентности, в цилиндрической системе координат. Для решения разработанной модели использовалась кросс-компилированная версия BlueCFD (Computational Fluid Dynamics) свободно распространяемого комплекса программ конечно-элементного анализа OpenFOAM [3]. Адекватность модели подтверждена результатами лабораторных экспериментов.

В качестве критерия эффективности ПМП использована дисперсия длины вектора скорости перемешиваемой жидкости, характеризующая степень равномерности поля скоростей перемешиваемой жидкости в объеме аппарата, т.е. отсутствия застойных зон и зон повышенных скоростей. Алгоритм решения задачи оптимизации параметров конструкции и режима функционирования МПУ разработан на основе теории планирования многофакторного вычислительного эксперимента. В качестве плана эксперимента выбран ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП).

В работе [2] приведены результаты применения разработанной методики для оптимизации параметров конструкции лабораторного аппарата, оснащаемого двухлопастной, турбинной открытой и трехлопастной мешалкой с наклонными лопастями. Полученные оптимальные значения ширины лопастей этих мешалок превышают рекомендуемые документом [4] в 1.7-2.5 раза. Значения дополнительных параметров конструкций мешалок (число лопастей и диаметр диска турбинной открытой

мешалки, угол наклона лопастей трехлопастной мешалки к горизонтали) определены методом перебора при оптимальных значениях основных.

В данной работе рассматривается структура, функции и результаты практического применения комплекса программ, реализующего предложенную методику оптимизации ПМП гомогенной жидкости в вертикальном емкостном аппарате.

В основе комплекса программ [5] лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных (как стационарных, так и нестационарных). В программе конечно-элементного анализа OpenFOAM большинство дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора выбирается пользователем в процессе расчета. Таким образом, полностью разделяются формирование расчетной сетки КЭ (метод дискретизации), дискретизация основных уравнений и их решение.

Комплекс программ включает модули ввода данных, формирования матрицы ОЦКП, построения конечно-элементной модели аппарата и МПУ, решения математической модели, определения параметров МПУ и вывода результатов, см. рис. 1. В качестве основного языка программирования выбран Python

1. В качестве основного языка программирования выбран Python



Рис. 1. Состав и структура комплекса программ оптимизации ПМП

В модуле 1 осуществляется ввод значений диаметра  $D_r$  и высоты  $H_r$  корпуса аппарата, объема  $V$  перемешиваемой жидкости, ее плотности  $\rho$  и кинематической вязкости  $\nu$ , указывается тип и число мешалок, типы, размеры и расположение внутренних устройств, определяется высота  $L$  заполнения аппарата без перемешивания и проверяется условие отсутствия переполнения при перемешивании:  $L \leq H_r/1.2$ .

В модуле 2 производится расчет частоты вращения вала МПУ, исходя из предельной мощности привода конкретного аппарата [4], задаются уровни натуральных значений параметров  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , определяются их кодированные значения, формируется матрица ОЦКП. Модуль 3 предназначен для генерации трехмерной геометрической модели аппарата и мешалки. Для разбиения модели на КЭ применяется библиотека параметрического 3D-моделирования ZenCad, использующая геометрическое ядро граничного представления OpenCascade и язык Python.

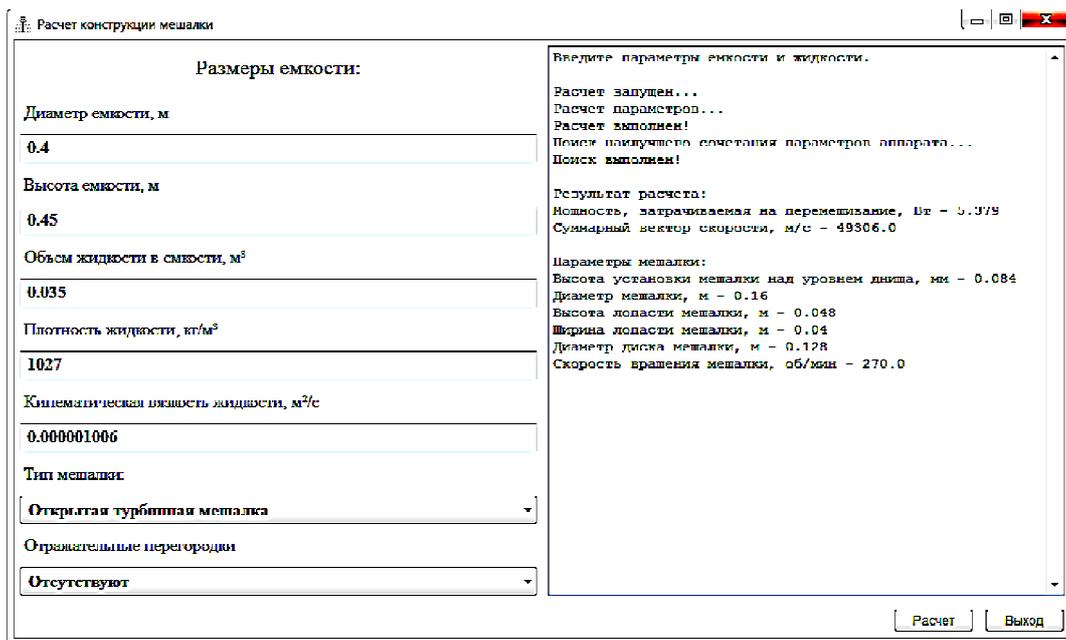


Рис. 2. Скриншот окна комплекса программ

В модуле 4 осуществляется решение математической модели ПМП с применением программы, разработанной на основе OpenFOAM, для каждой комбинации кодированных значений параметров, предусмотренной матрицей ОЦКП, расчет соответствующих значений критерия (4). Модуль 5 осуществляет формирование полинома регрессии, поиск его минимума, расчет оптимальных натуральных значений параметров  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ , выбор оптимальных значений дополнительных параметров и вывод результатов в окне комплекса программ, см. рис. 2.

Проведено сравнение разработанного комплекса программ с популярными системами инженерного анализа ANSYS Fluent и COMSOL Multiphysics по получаемым результатам и быстродействию. В качестве тестовой задачи использовалась задача расчета поля скоростей и затрат мощности на перемешивание в лабораторном аппарате, см. [1,2], с двухлопастной мешалкой при тех же параметрах перемешиваемой жидкости, что и при проверке адекватности математической модели ПМП.

Как видно (см. табл. 1), значения мощности, затрачиваемой на перемешивание, полученные разными программами различаются менее, чем на 5 %, что свидетельствует о корректности используемой модели и выбранной сетки конечных элементов. При сравнимом количестве КЭ, формируемых в 3D-модели аппарата и мешалки, очевидно преимущество разработанного комплекса программ с точки зрения продолжительности расчета с учетом затрат времени на разработку и переработку 3D-модели аппарата и мешалки при изменении значений  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ .

Таблица 1. Сравнение программ расчета поля скоростей ПМП

Программа	Частота вращения мешалки $n$ , об/мин	Мощность $N$ , мВт	Отклонение значения мощности от расчета в разработанной системе, %	Число конечных элементов в модели	Продолжительность расчета, мин	Отклонение по времени от расчета в разработанной системе, %
ANSYS Fluent	20	9,12	+3	220 103	178	+12
	40	17,18	+4		178	+15
	60	27,69	+4		180	+15
	80	36,63	+3		184	+14
	100	42,16	+3		179	+16
COMSOL Multiphysics	20	9,00	+2	213 692	199	+24
	40	16,98	+3		196	+25
	60	27,32	+3		196	+24
	80	36,77	+4		199	+24
	100	42,08	+3		196	+24
Разработанный комплекс программ оптимизации и ПМП	20	8,82	-	210 401	162	-
	40	16,49			166	
	60	26,52			168	
	80	35,36			171	
	100	40,85			169	

Разработанный комплекс программ оптимизации ПМП применен для модификации конструкции МПУ промышленного аппарата, оснащенного якорной мешалкой, который установлен в цехе №15 АО «Пигмент», г. Тамбов и реализует процесс репульпации пасты фталоцианина меди в водном растворе серной кислоты при температуре 200°C и атмосферном давлении. При существующей конструкции МПУ наблюдается неравномерное начальное распределение частиц пасты в объеме перемешиваемой жидкости, и, как следствие, их прилипание к стенкам корпуса и спекание.

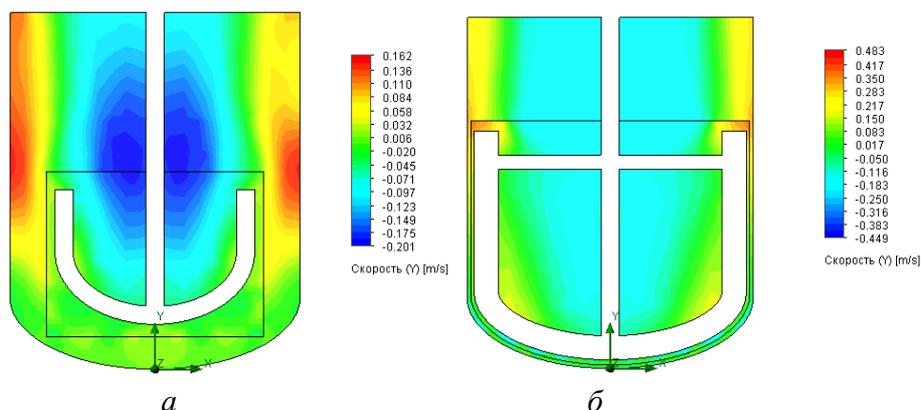


Рис. 3. Поле скоростей жидкости в аппарате для репульпации *a* – при начальной конструкции МПУ, *б* – при итоговой конструкции МПУ

Цель работ по модификации существующего МПУ – повышение степени равномерности начального распределения пасты фталоцианина меди по объему аппарата и устранение прилипания ее частиц к стенкам аппарата, сокращение продолжительности стадии репульсации и снижение энергопотребления аппарата.

Поле скоростей жидкости, перемешиваемой мешалкой существующей конструкции, представлено на рис. 3а. Как видно, скорости жидкости в центральной и периферийной зонах объема аппарата существенно различаются (значение дисперсии длины вектора скорости жидкости в аппарате  $K_{SVS} = 5.46$ ), что, видимо, и приводит к неравномерному начальному распределению частиц пасты фталоцианина меди по объему аппарата.

В результате решения задачи оптимизации ПМП установлено, что минимальному значению  $K_{SVS} = 1.34$  соответствуют следующие значения параметров конструкции МПУ:  $D_m = 0.95D_r$ ,  $h_{hm} = 0.05D_m$ ,  $H_m = 0.15D_m$ ,  $B_m = 0.85D_m$ . Рекомендации [4] для якорных мешалок:  $D_m/D_r = 0.7 \div 0.9$ ,  $h_{hm} \geq 0.5(D_r - D_m)$ ,  $H_m/D_m = 0.1$ ,  $B_m/D_m = 0.7$ . Оптимальное значение дополнительного параметра конструкции мешалки – высоты ее лопасти  $B_m$  – определено методом перебора при оптимальных значениях  $D_m$ ,  $H_m$  и  $h_{hm}$ .

Как видно, результаты оптимизации параметров конструкции МПУ отличаются от рекомендаций [4] по конструкциям МПУ с якорными мешалками.

Таким образом, за счет модификации конструкции МПУ удалось существенно повысить степень равномерности поля скоростей жидкости в аппарате, см. рис. 3б: значение критерия оптимальности уменьшилось более, чем в 4 раза. Дополнительная поперечная перемычка установлена для обеспечения необходимой прочности лопастей модифицированной мешалки.

Для подтверждения эффективности модифицированной конструкции и измененной высоты расположения мешалки над днищем аппарата была реализована обработка нескольких пробных партий пасты фталоцианина меди. По ее результатам сделаны следующие выводы:

- образование отложений на стенках корпуса аппарата практически отсутствует;
- необходимую продолжительность стадии репульсации можно сократить с 20 до 18 ч., а поскольку она является лимитирующей по времени в процессе производства фталоцианина меди, то мощность производства можно увеличить с 1188 до 1320 т/год;
- мощность привода МПУ можно уменьшить на 16 %.

Таким образом, разработан комплекс программ оптимизации ПМП, сравнение результатов применения которого с популярными системами инженерного анализа ANSYS Fluent и COMSOL Multiphysics подтвердило его эффективность. В результате применения комплекса программ для решения задачи оптимизации параметров МПУ промышленного аппарата АО «Пигмент», г. Тамбов предложены модификации его конструкции, позволившие устранить образование отложений на стенках аппарата, сократить на 10% продолжительность стадии репульсации пасты фталоцианина меди, уменьшить на 16 % затраты мощности на перемешивание.

Список использованных источников

1. Мартьянов, Е.И. Оптимизация процесса перемешивания жидкости в вертикальных емкостных аппаратах с механическими перемешивающими устройствами / Е.И. Мартьянов, С.В. Карпушкин // Вестник Тамбовского ГТУ. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 280-293.
2. Карпушкин, С.В. Оптимизация параметров механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов / С.В. Карпушкин, Е.И. Мартьянов // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 6. – С. 41-48.
3. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
4. OpenFOAM – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fsweb.info/caesad/openfoam.html> (дата обращения: 10.06.2024).
5. Руководящий нормативный документ РД 26-01-90-85: Механические перемешивающие устройства, метод расчета; Введ. с 01.01.1986. – Л.: РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023613829. Программа оптимизации конструктивных параметров и режима функционирования механических перемешивающих устройств / Е.И. Мартьянов, С.В. Карпушкин; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – Заявка № 2023612580 09.02.2023 г.; опубл. 20.02.2023 г. – 1 с.

УДК 004.853

**Котов В.В.<sup>1</sup>, Бобро Е.В.<sup>2</sup>, Немтинов В.А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Новолипецкий металлургический комбинат, Россия, г. Липецк  
e-mail: fraservlk@gmail.com

<sup>2,3</sup>Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
<sup>2</sup>e-mail: fezlobin142@mail.ru

<sup>3</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

## **ПРОБЛЕМА СИНГУЛЯРНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ РЕЗАНИЯ НА ТОКАРНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

**Kotov V.V.<sup>1</sup>, Bobro E.V.<sup>2</sup>, Nemtinov V.A.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Novolipetsk Metallurgical Combine, Lipetsk, Russia  
e-mail: fraservlk@gmail.com

<sup>2,3</sup>Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
<sup>2</sup>e-mail: fezlobin142@mail.ru

<sup>3</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

## **SINGULARITY PROBLEM IN CONSTANT-SPEED CUTTING MACHINING ON TURNING EQUIPMENT**

*Аннотация.* Настоящая статья посвящена исследованию проблемы сингулярности, возникающей при обработке деталей на токарном оборудовании с постоянной скоростью резания. Рассматриваются причины появления такого явления, включая геометрические особенности режущего инструмента и кинематику станка. Особое внимание уделено влиянию условий обработки (скорость подачи, глубина резания, материал заготовки) на возникновение сингулярности и способы её предотвращения.

*Ключевые слова:* сингулярность, токарное оборудование, постоянная скорость резания, режущий инструмент, критические зоны, режимы обработки, управление оборудованием, программно-аппаратные методы, технологическая подготовка, числовое программное управление.

*Abstract.* This article is devoted to the study of the singularity problem that occurs when machining parts on turning equipment with a constant cutting speed. The reasons for the appearance of such a phenomenon are considered, including the geometric features of the cutting tool and the kinematics of the machine. Special attention is paid to the influence of processing conditions (feed rate, cutting depth, workpiece material) on the occurrence of a singularity and ways to prevent it.

*Keywords:* singularity, turning quipment, constant turning speed, cutting tools, critical zones, processing modes, equipment management, software and hardware methods, technological preparation, numerical control.

Концепция постоянной скорости резания (CSS - ConstantSurfaceSpeed) основана на фундаментальном принципе теории резания металлов, согласно которому для обеспечения оптимальных условий работы режущего инструмента необходимо поддерживать постоянную линейную скорость на поверхности контакта инструмента с заготовкой [1]. В отличие от традиционного режима обработки с постоянной частотой вращения шпинделя, режим CSS автоматически изменяет частоту вращения заготовки в зависимости от текущего диаметра обработки, что особенно актуально при продольном точении (рис.1), когда диаметр заготовки изменяется в широких пределах. [2]

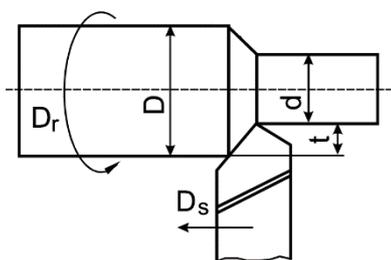


Рис. 1. Схема продольного точения

Однако при всех преимуществах режима CSS существует фундаментальная математическая проблема, известная как проблема сингулярности, которая возникает при приближении инструмента к оси вращения заготовки. В этой точке, где диаметр обработки стремится к нулю, для поддержания постоянной скорости резания теоретически требуется бесконечно большая частота вращения шпинделя, что физически невозможно и создаёт серьёзные технологические проблемы. Фундаментальная зависимость между скоростью резания, диаметром заготовки и частотой вращения шпинделя описывается классической формулой:

$$V = \pi D N / 1000. \quad (1)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $D$  – текущий диаметр обработки, мм;  $N$  – частота вращения шпинделя, об/мин;  $\pi \approx 3.14159$  – математическая константа.

Из формулы (1) следует, что для поддержания постоянной скорости резания  $V = const$  при изменении диаметра  $D$  необходимо соответствующим образом изменять частоту вращения  $N$ . Преобразуя формулу (1), получаем выражение для требуемой частоты вращения:

$$N = 1000V / \pi D. \quad (2)$$

Анализ формулы (2) показывает, что зависимость  $N(D)$  является гиперболической: при уменьшении диаметра обработки частота вращения возрастает обратно пропорционально. Математически это означает, что при  $D \rightarrow 0$  имеем  $N \rightarrow \infty$ , что представляет собой классическую сингулярность функции [3].

Принцип работы режима CSS на токарных станках с ЧПУ реализуется следующим образом: система управления станком непрерывно отслеживает текущую координату инструмента и вычисляет актуальный диаметр обработки исходя из заданной траектории перемещения. На основе заданной программой скорости резания и текущего диаметра контроллер в реальном времени рассчитывает необходимую частоту вращения шпинделя по формуле (2) и осуществляет её регулирование через систему привода главного движения. Режим CSS активируется специальными G-кодами: G96 (включение режима постоянной скорости резания) с указанием требуемой скорости, например, G96 S150 устанавливает постоянную скорость резания 150 м/мин [4].

В контексте токарной обработки сингулярность определяется как критическая геометрическая конфигурация процесса резания, при которой траектория движения режущей кромки инструмента проходит через область малых диаметров (близких к оси вращения заготовки), где для поддержания заданной скорости резания требуется частота вращения, превышающая физические возможности оборудования или допустимые технологические параметры. Практически сингулярность начинает проявляться при диаметрах обработки менее 10-20 мм, когда требуемая частота вращения достигает критических значений.

Если максимальная частота вращения шпинделя станка составляет 4000 об/мин, то критический диаметр, при котором начинается сингулярность, можно определить из соотношения:

$$D_{кр} = 1000 V / \pi N_{max}. \quad (3)$$

Критические зоны возникновения сингулярности определяются характером траектории инструмента и геометрией обрабатываемой детали. К наиболее проблемным операциям относятся:

Подрезка торцов – при движении резца от периферии к центру детали диаметр обработки монотонно уменьшается от максимального до нуля в центральной точке. В процессе подрезки инструмент неизбежно проходит через зону сингулярности. Обработка канавок и отрезка – при формировании узких канавок или отрезке детали эффективный диаметр резания может становиться критически малым, особенно при использовании узких резцов.

Центрование и сверление – операции образования центровых отверстий всегда начинаются в геометрическом центре детали, где диаметр равен нулю.

Обработка фасонных поверхностей – при формировании сложных криволинейных профилей траектория инструмента может многократно пересекать критическую зону малых диаметров, создавая повторяющиеся эпизоды сингулярности.

Точение конических поверхностей с малым углом – при обработке конусов с углом, близким к  $90^\circ$  относительно оси детали, инструмент длительное время находится в области малых диаметров [5].

Проблема сингулярности порождает комплекс серьёзных технологических и технических проблем, которые могут привести к браку деталей, повреждению оборудования и снижению безопасности работы.

Физические ограничения оборудования представляют собой первичный барьер в реализации режима CSS. Каждый токарный станок имеет конструктивно ограниченную максимальную частоту вращения шпинделя  $N_{max}$ , определяемую характеристиками электродвигателя, прочностью механических передач, балансировкой вращающихся элементов и конструкцией подшипниковых узлов. Типичные значения максимальной частоты составляют 3000-6000 об/мин для универсальных токарных станков, 6000-12000 об/мин для прутковых автоматов. При попытке системы управления превысить  $N_{max}$  возникает конфликт между программным требованием и физическими возможностями оборудования [6].

Опасность разрушения инструмента и заготовки существенно возрастает в зоне сингулярности. При резком увеличении частоты вращения возрастают центробежные силы, действующие на заготовку и патрон. Для вращающейся массы центробежная сила пропорциональна квадрату угловой скорости:  $F_{ц} \sim \omega^2 \sim N^2$ . Это означает, что при увеличении частоты вращения в два раза центробежные нагрузки возрастают в четыре раза. При критических значениях  $N$  возможны: вырывание заготовки из патрона, особенно при недостаточно надёжном закреплении; разрушение быстровращающихся элементов крепления; поломка тонкостенных участков детали; вылет режущих пластин из корпуса сборного инструмента вследствие инерционных нагрузок.

Возникновение вибраций и потеря точности обработки являются неизбежным следствием работы на критически высоких частотах вращения. При приближении к резонансным частотам системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД) резко возрастает амплитуда колебаний. Вибрации приводят к ухудшению качества обработанной поверхности, появлению волнистости и огранки, снижению точности размеров и формы детали. Особенно опасны параметрические резонансы, возникающие при совпадении частоты вращения шпинделя с собственными частотами колебаний элементов технологической системы. В зоне сингулярности частота вращения изменяется в широком диапазоне, что многократно повышает вероятность попадания в резонансную область.

Перегрев режущего инструмента связан с тем, что в области малых диаметров резания, несмотря на снижение абсолютной скорости резания (при ограничении  $N_{max}$ ), происходит концентрация теплового потока на малой площади режущей кромки. Кроме того, частые ускорения и замедления шпинделя при прохождении критических зон вызывают циклические термомеханические нагрузки на инструмент, способствующие образованию термоусталостных трещин и преждевременному выходу инструмента из строя. Ситуация усугубляется тем, что при высоких частотах вращения

затрудняется подвод смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону резания из-за возникновения аэродинамических эффектов.

Износ подшипников и механизмов шпинделя ускоряется при работе в режиме частых изменений частоты вращения и при длительной работе на максимальных оборотах. Подшипниковые узлы шпинделя рассчитаны на определённый ресурс при номинальных режимах работы. Постоянная работа на пределе технических возможностей приводит к повышенному нагреву подшипников, ускоренному износу беговых дорожек и тел качения, деградации смазочного материала и, в конечном итоге, к преждевременному выходу из строя дорогостоящих узлов станка. Кроме того, интенсивные разгоны и торможения шпинделя создают дополнительные нагрузки на систему привода главного движения, увеличивая износ ременных передач, муфт и редукторов.

Для предотвращения негативных последствий сингулярности был разработан комплекс программно-аппаратных методов, которые реализуются на различных уровнях системы управления станком и технологического процесса.

Программное ограничение максимальной частоты вращения является наиболее простым и эффективным методом защиты от сингулярности. В системах ЧПУ токарных станков предусмотрены специальные команды для установки предельного значения частоты вращения шпинделя. В соответствии со стандартами программирования ISO 6983 (G-code) используются команды G50 (в системах управления FANUC, HAAS) или G92 (в некоторых других системах). Синтаксис команды: G50 S[значение], где значение указывается в об/мин. [7]. Например, команда G50 S3500 устанавливает максимальную частоту вращения 3500 об/мин, которая не будет превышена даже в режиме CSS, независимо от диаметра обработки.

При выборе значения ограничения необходимо учитывать технические характеристики станка, тип закрепления заготовки, её геометрию и массу, требования безопасности.

Такой подход обеспечивает оптимальные условия резания на большей части траектории при гарантированной безопасности в критических зонах.

Использование адаптивных алгоритмов управления в современных системах ЧПУ представляет собой наиболее совершенный подход к решению проблемы сингулярности. Современные контроллеры (FANUC серии 30i/31i/32i, SIEMENS SINUMERIK 840D, HEIDENHAIN iTNC 640 и др.) оснащены интеллектуальными функциями автоматического управления параметрами резания. Эти системы осуществляют непрерывный мониторинг нагрузки на шпиндель, крутящего момента, мощности привода и автоматически корректируют скорость подачи и частоту вращения для предотвращения перегрузок. Некоторые системы позволяют задавать нелинейные зависимости скорости резания от диаметра, автоматически снижая  $V$  при приближении к оси вращения [5].

Применение специальных циклов обработки, предусмотренных в системах ЧПУ, позволяет автоматизировать управление режимами резания в сложных ситуациях.

Например, циклы подрезки торца (G94 в системах FANUC) и циклы продольного точения (G90) со встроенными алгоритмами автоматической коррекции скорости резания в зависимости от диаметра [8]. Использование таких циклов снижает вероятность программных ошибок и упрощает работу оператора.

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Голфимбель. G96 G-Code. Постоянная поверхностная скорость / Голфимбель // CNC Maniac: [Электронный ресурс]. — URL: <https://cnc-maniac.ru/g96-g-code-postojannaja-poverhnoznaja-skorost> (дата обращения: 10.10.2025).
3. Режущие режимы при токарной обработке / Абамет // Abamet: [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.abamet.ru/press/article/rezhushchij-instrument/rezhimy-rezaniia-pri-tokarnoi-obrabotke> (дата обращения: 10.10.2025).
4. Понимание подачи и скорости при обработке на станках с ЧПУ / MartinSupply // MartinSupply : [Электронный ресурс]. — URL: <https://martinsupply.com/cnc-machining-understanding-feeds-speeds> (дата обращения: 10.10.2025).
5. Режимы резания при токарной обработке / Temp-VP // Temp-VP: [Электронный ресурс]. — URL: <https://temp-vp.ru/faq/articles/stati-po-metalloobrabotke/rezhimy-rezaniya-pri-tokarnoj-obrabotke> (дата обращения: 13.10.2025).
6. Техника безопасности на станках с ЧПУ / Frezeru // Frezeru: [сайт]. — URL: <https://frezeru.ru/sanitarnye-normy-na-proizvodstve/tehnika-bezopasnosti-na-chpu-stankah.php> (дата обращения: 14.10.2025).
7. G50 G-Code. Установка нулевых координат / ETCN Machining // ETCN Machining : [Электронный ресурс]. — URL: <https://etcnmachining.com/ru/blog/g50-cnc-code> (дата обращения: 15.10.2025).
8. Измерительные циклы программы для определения траектории и действия станка / VectorEtalon // VectorEtalon: [Электронный ресурс]. — URL: <https://vectoretalon.ru/biblioteka/stati/izmeritelnyye-tsikly-programma-dlya-opredeleniya-trayektorii-i-deystviya-stanka> (дата обращения: 15.10.2025).

УДК 4.009

**Мокрозуб В.Г., Звонков Д.Г., Полянский А.В., Нагайцев И.В.**  
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: mokrozubv@yandex.ru

## **ОНТОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ СВАРКИ СТАЛЬНЫХ ОБЕЧАЕК**

**Mokrozub V.G., Zvonkov D.G., Polyansky A.V., Nagaytsev I.V.**  
Tambov State Technical University, Tambov, Russia  
e-mail: mokrozubv@yandex.ru

## **ONTOLOGY OF DETERMINING THE WELDING TIME OF STEEL SHELLS**

*Аннотация.* Представлено описание онтологии, предназначенной для определения времени сварки стальных обечаек в зависимости от их толщины и диаметра.

*Ключевые слова:* время сварки, обечайки, онтология.

*Abstract.* An ontology is described for determining the welding time of steel shells depending on their thickness and diameter.

*Keywords:* welding time, shells, ontology.

Сварка широко используется при изготовлении технологического оборудования (емкостные аппараты, кожухотрубчатые теплообменники, выпарные аппараты, колонные аппараты и др.). Основным элементом этих аппаратов являются обечайки [1-3]. Технологическая подготовка изготовления этих аппаратов включает в себя расчет времени на сварку. Одним из способов определения времени сварки является использование уже накопленного опыта, который выражается в виде правил «Если ..., то ...». Примеры правил определения норм времени на один кольцевой шов.

Правило 1. Если Толщина\_металла = 30 мм И Диаметр\_обечаек = 800 мм, То Норма\_времени\_на\_один\_шов = 3,6 час.

Правило 2. Если Толщина\_металла = 45 мм И Диаметр\_обечаек = 2200 мм, То Норма\_времени\_на\_один\_шов = 14,4 час.

Правило 3. Если Толщина\_металла = 110 мм И Диаметр\_обечаек = 4800 мм, То Норма\_времени\_на\_один\_шов = 133,1 час.

Прототип онтологии разработан в свободно распространяемом редакторе онтологий Protégé. На рис. 1 представлены классы объектов онтологии: Детали, Сварка, Толщина\_металла.

Свойства класса Детали представлены на рис. 2. На рис. 3 и рис. 4 представлены классы Сварка и Толщина\_металла соответственно.

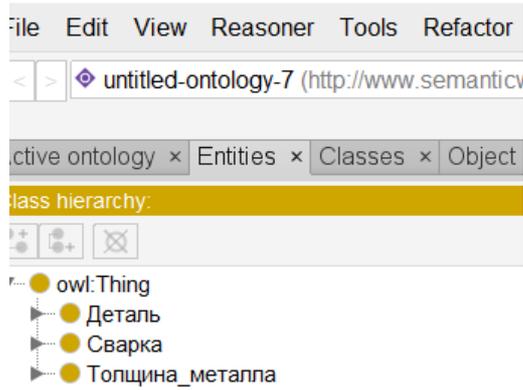


Рис. 1. Классы онтологии сварки

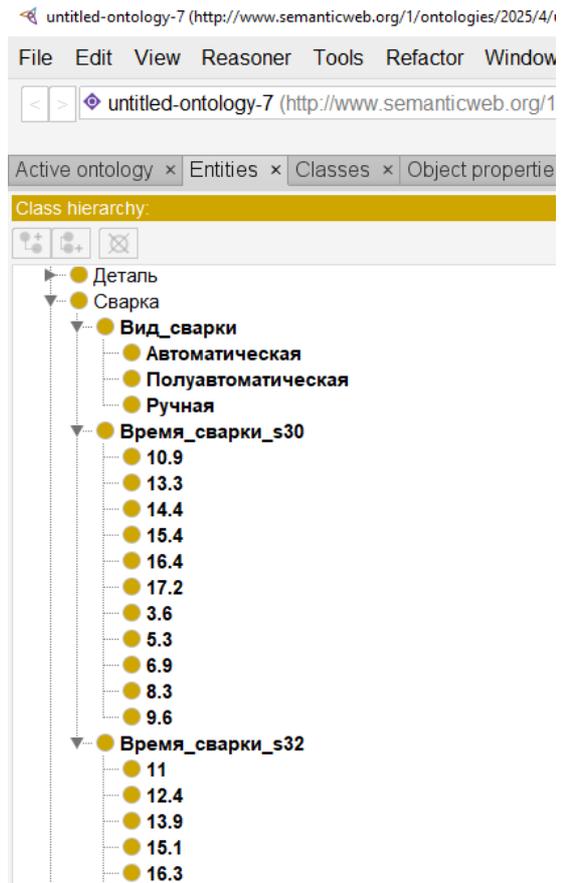


Рис. 3. Класс «Сварка»

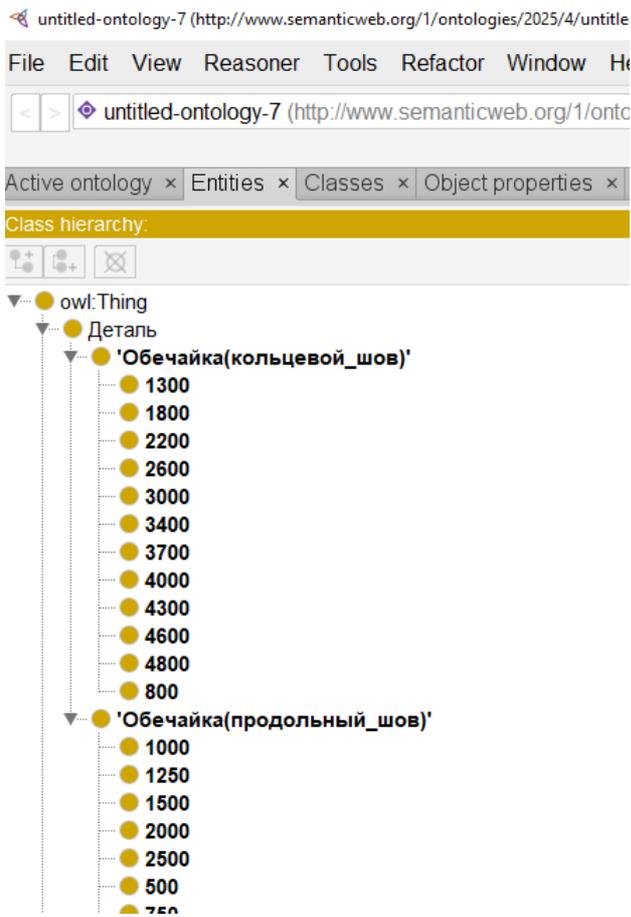


Рис. 2. Класс «Деталь»

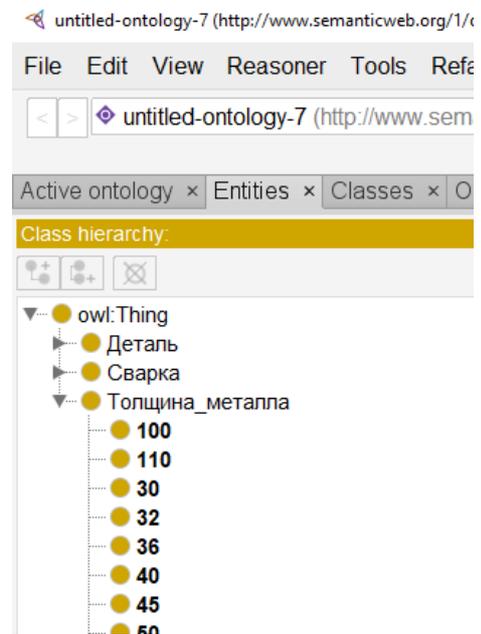


Рис. 4. Класс «Толщина\_металла»

На рис. 5 представлен пример записи правила: Если Толщина\_металла = 30 мм И Диаметр\_обечаяк = 800 мм, То Норма\_времени\_на\_один\_шов = 3,6 час. Пример запроса на определение времени сварки представлен на рис. 6.

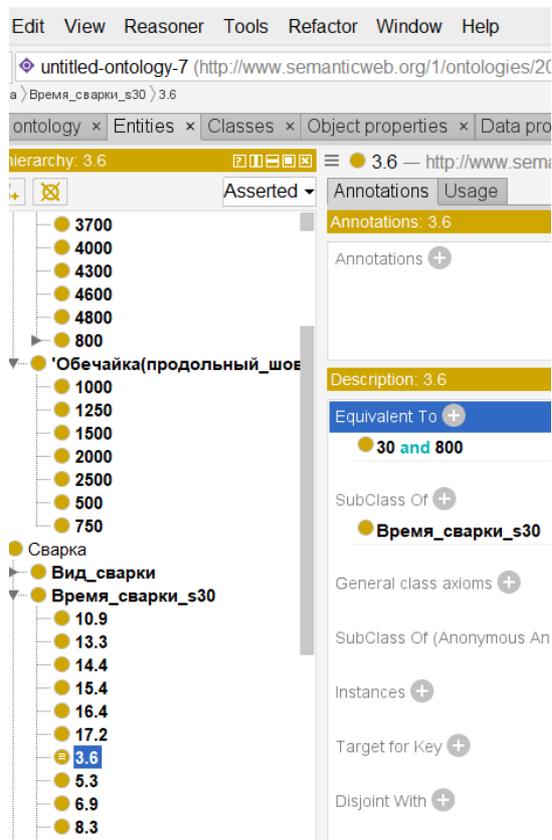


Рис. 5. Пример правила

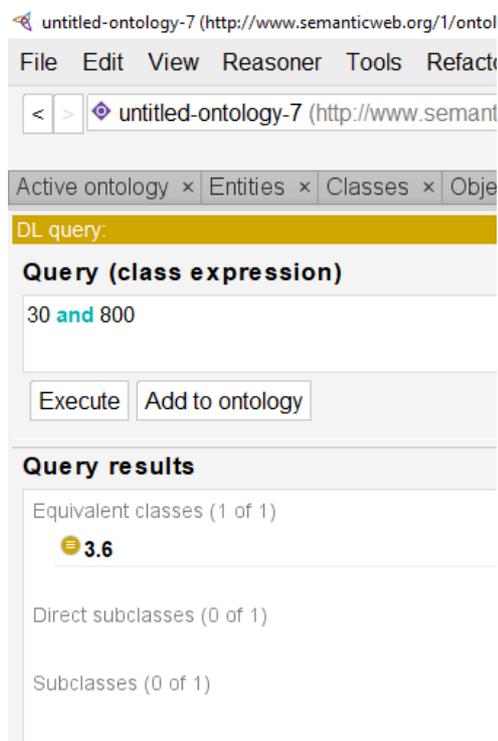


Рис. 6. Пример запроса на определение времени сварки

Представленная онтология является прототипом. Дальнейшие исследования будут связаны с заданием вида сварки и материала свариваемых деталей.

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Моделирование и оптимизация высокоточных технических объектов / Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский [и др.] // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : , Тамбов, 14–16 ноября 2018 года. Том 1, Выпуск 5. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2018. – С. 35-41.
3. Доброва, Н. С. Внедрение компьютерной поддержки принятия решений при технологической подготовке машиностроительного производства / Н. С. Доброва, В. А. Немтинов // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики - 2018 : Материалы Всероссийского открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2018. – С. 174-177. – EDN VMOIMC.

УДК 62

**Фарур Х.<sup>1</sup>, Борщев В. Я.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: hamza.faarour@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: borschov@yandex.ru

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАСКАДНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО СМЕСИТЕЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В SOLIDWORKS**

**Farour H.<sup>1</sup>, Borshchev V.Ya.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: hamza.faarour@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: borschov@yandex.ru

## **DESIGN OF CASCADE GRAVITY MIXER OF BULK MATERIALS IN SOLIDWORKS**

*Аннотация.* В статье представлены описание и результаты трёхмерного моделирования каскадного гравитационного смесителя сыпучих материалов, выполненные в среде SolidWorks.

Рассматривается устройство, которое работает на основе последовательного передвижения частиц под действием силы тяжести. Целью разработки является обеспечение равномерного распределения частиц сыпучих материалов и повышение эффективности процесса смешивания.

Разработанная 3D-модель гравитационного смесителя сыпучих материалов готова к использованию в программе Altair EDEM для численного моделирования поведения частиц. Этот метод позволяет провести анализ динамики сыпучих материалов без проведения физических экспериментов в начале процесса.

Исследование основано на идее о том, как создать эффективные смесители с помощью комбинации цифрового моделирования и механического проектирования.

Этот этап является подготовительным этапом для последующего численного анализа работы смесителя.

*Ключевые слова:* SolidWorks, каскадный гравитационный смеситель, сыпучие материалы, конструкция устройства, Altair EDEM.

*Abstract.* The article presents a description and the results of 3D modeling of a cascade gravitational mixer for bulk materials, performed in the SolidWorks environment.

A device is considered that operates based on the sequential movement of particles under the influence of gravity. The aim of the development is to ensure uniform distribution of particulate materials and increase the efficiency of the mixing process.

The developed 3D model of the gravity mixer for bulk materials is ready for use in the Altair EDEM software for numerical simulation of particle behavior. This method allows for the analysis of the dynamics of granular materials without conducting physical experiments at the beginning of the process.

The study is based on the idea of how to create effective mixers using a combination of digital modeling and mechanical design.

This stage is a preparatory stage for the subsequent numerical analysis of the mixer's operation.

*Keywords:* SolidWorks, cascade gravity mixer, bulk materials, device design, Altair EDEM.

Каскадные гравитационные смесители зернистых материалов используются во многих отраслях промышленности. Они разработаны таким образом, чтобы сыпучие материалы равномерно смешивались, что является важным условием для обеспечения качества конечного продукта [1].

Существующие каскадные гравитационные смесители имеют несколько недостатков, в том числе:

1. Неравномерное смешивание приводит к высокой неоднородности смеси при использовании материалов с различными физическими свойствами.
2. Трудности с обслуживанием, которые могут значительно снизить производительность производственного процесса [2].

Каскадный гравитационный смеситель сыпучего материала был разработан авторами настоящей работы. В разработанной конструкции высокое качество смеси достигается за счет создания разрыхленных потоков, многократного перераспределения этих потоков и равномерного распределения смешиваемых материалов в поперечном и продольном сечениях смесителя [3].

В программном обеспечении SolidWorks была создана трёхмерная модель гравитационного смесителя сыпучих материалов. Цель состоит в том, чтобы обеспечить равномерное и эффективное перемешивание сыпучих компонентов с помощью каскадного принципа на основе силы тяжести и перекрёстных потоков.

В конструкции устройства используется цилиндрический корпус 1, основной элемент, выполненный с высокой точностью, чтобы разместить внутренние компоненты и организовать процесс смешивания, как показано на рис. 1. Вверху корпуса закреплены два загрузочных патрубка 2, 3 для подачи материалов, а внизу - разгрузочный патрубок 4 для вывода готовой смеси. Равномерное распределение компонентов по поперечному сечению смесителя обеспечивается с помощью установленного по оси корпуса распределителя потока 5.

Для создания каскадной структуры перемешивания внутри корпуса верхние 6 и нижние 7 пересыпные воронки расположены последовательно по высоте. Чтобы направлять частицы компонентов к зонам интенсивного смешивания, над каждой нижней воронкой установлена направляющая воронка 8.

Верхняя пересыпная воронка 6 состоит из чередующихся рядов высоких усечённых конусов 9 с осевой симметрией, начинающиеся с внешнего ряда, и низких перевернутых усечённых конусов 10 во внутренних рядах (рис. 2). Между этими конусами установлены изогнутые лопатки с противоположными наклонами в соседних рядах. Вследствие этого организуются перекрёстные потоки, которые вызывают активное перемешивание частиц сыпучего материала.

Нижняя пересыпная воронка 7 также состоит из высоких 12 и низких 13 усечённых конусов, установленных широким основанием вниз, с одинаковым углом наклона к вертикали и равномерными зазорами по горизонтальной проекции. В зазорах между высокими и низкими усечёнными конусами также размещены изогнутые лопатки 14 с противоположным наклоном (рис. 3).

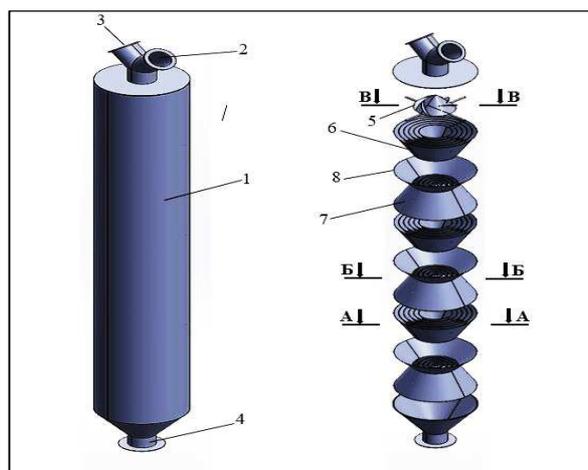


Рис. 1. Каскадный гравитационный смеситель сыпучих материалов

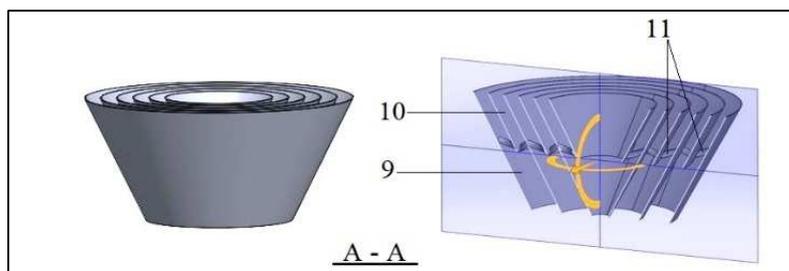


Рис. 2. Внутреннее распределение элемента 6 каскадного гравитационного смесителя – продольный разрез А-А

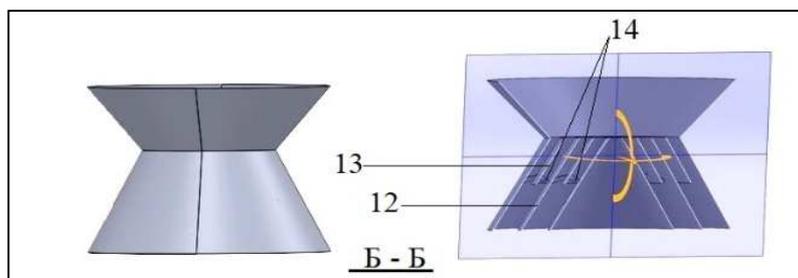


Рис. 3. Внутреннее распределение элемента 7 каскадного гравитационного смесителя – продольный разрез Б-Б

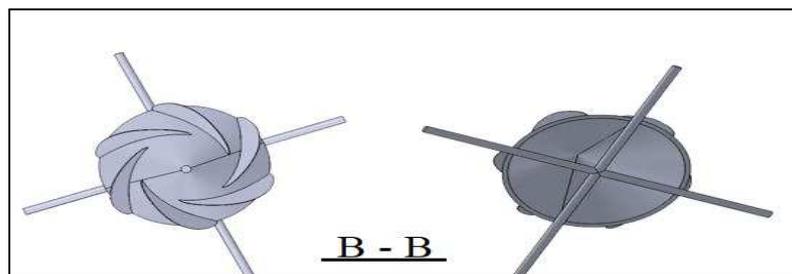


Рис. 4. Распределитель потока материала

Принцип работы гравитационного смесителя сыпучих материалов.

На начальном этапе исходные компоненты подаются с помощью дозатора через загрузочные патрубки 2 и 3 в цилиндрический корпус смесителя и равномерно распределяются по конусному распределителю потока материала 5. С помощью винтовых лопастей распределителя поток сыпучего материала распределяется равномерно по всему поперечному сечению корпуса смесителя.

Сыпучий материал поступает в верхнюю пересыпную воронку 6 в виде параллельных разрыхленных потоков в кольцевые зазоры, образованные перевёрнутыми усечёнными конусами 9 и 10. В этих зазорах траектория движения частиц меняется, когда они сталкиваются с изогнутыми лопастями и внутренними поверхностями конусов 11. В соседних зазорах они начинают двигаться в противоположные стороны по концентрическим окружностям, что способствует их активному поперечному и продольному перемешиванию.

Затем частично перемешанный материал направляется через направляющую воронку 8 к нижней пересыпной воронке 7 в зону интенсивного перемешивания. Здесь частицы попадают в кольцевые зазоры, образованные усечёнными конусами 12 и 13. Процесс смешивания повторяется, обеспечивая дополнительное перераспределение частиц в перекрёстных потоках.

В зазорах нижней воронки частицы также взаимодействуют с изогнутыми лопастями 14, меняя свою траекторию, что обеспечивает дополнительное перемешивание и улучшает однородность смеси.

Готовая смесь выгружается через патрубок 4.

В ходе этого исследования были разработаны четыре модели смесителя, которые отличались только количеством ступеней каскада: 4, 6, 8 и 10 (рис. 5). По геометрическим параметрам все модели идентичны, за исключением количества ступеней, что позволяет проводить сравнительные исследования в будущих работах.

Программное обеспечение Altair EDEM, основанное на методе дискретных элементов (DEM), является актуальным инструментом для численного моделирования поведения сыпучих материалов [4, 5].

Этот подход дает возможность рассмотреть движение и взаимодействие отдельных частиц, что позволяет получить полное понимание процессов, происходящих внутри смесителей, транспортеров и других устройств, работающих в зернистых средах [6, 7].

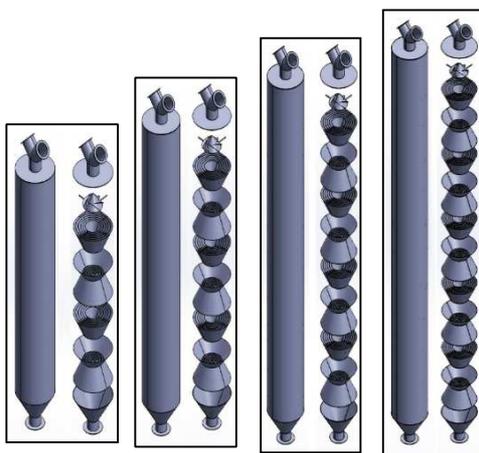


Рис. 5. Графическое представление моделей с различным количеством ступеней: 4, 6, 8, 10

Точные геометрические модели можно интегрировать с физически обоснованными моделями с помощью Altair EDEM и CAD-систем, таких как SolidWorks [8, 9]. После создания 3D-модели смесителя в SolidWorks необходимо импортировать ее в EDEM, чтобы провести анализ динамики частиц в реальной среде работы устройства, как показано на рис. 6.

Основным преимуществом использования Altair EDEM является возможность оценить эффективность конструкции еще на этапе проектирования, что снижает необходимость проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний [4]. Кроме того, программа может имитировать различные свойства частиц, такие как упругость, плотность, размер и коэффициент трения. Это обеспечивает точность и гибкость анализа.

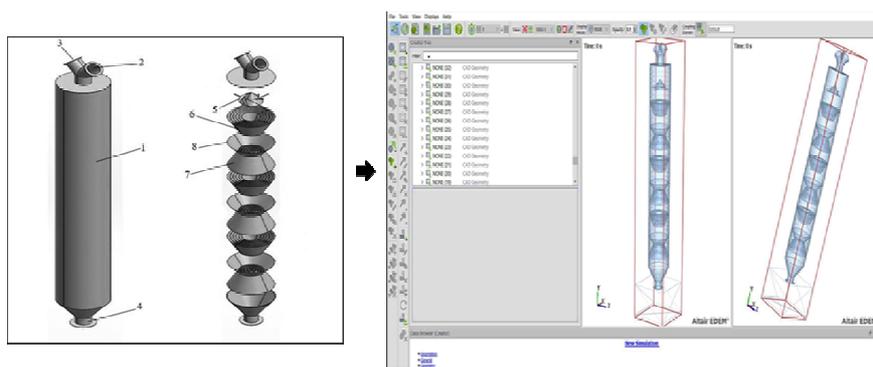


Рис. 6. Переход от инженерного проектирования (SolidWorks) к численному моделированию (DEM simulation) каскадного гравитационного смесителя

В работе описаны и подвергнуты трехмерному моделированию конструктивные особенности каскадного гравитационного смесителя сыпучих материалов в средстве

SolidWorks и рассмотрены перспективы дальнейшего использования Altair EDEM для численного анализа смешивания.

Созданная модель позволяет отследить конструктивные характеристики каскадного гравитационного смесителя и метод его работы в зависимости от количества ступеней смешивания частиц сыпучих материалов.

Комплексное использование метода DEM и САПР-системы открывает горизонты разработки в области исследования параметров смешивания – распределение частиц, коэффициент однородности.

#### Список использованных источников

1. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
2. Nienow, A. W., Edwards, M. F., Harnby, N. *Mixing in the Process Industries*. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p.
3. Пат. 2821456 Российская Федерация, МПК В01F 23/60 (2022.01). Гравитационный смеситель сыпучих материалов / Борщев В. Я., Фарур Х., Макаров В. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2024109721 ; заявл. 10.04.2024 ; опубл. 24.06.2024, Бюл. № 18. – 11 с.
4. Altair Engineering Inc. *Altair EDEM 2023: Theory Manual*. – Altair Documentation, 2023. – 54 p.
5. Cundall, P. A., Strack, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Géotechnique*. – 1979. – Vol. 29, № 1. – P. 47–65.
6. Tsuji, Y., Tanaka, T., Ishida, T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe // *Powder Technology*. – 1992. – Vol. 71. – P. 239–250.
7. Cleary, P. W. DEM simulation of industrial particle flows: Case studies of mixing, segregation and comminution processes // *Powder Technology*. – 2008. – Vol. 179. – P. 144–163.
8. Altair Engineering Inc. *Using SolidWorks Geometry in Altair EDEM for DEM Simulation*. – Altair Technical Guide, 2022.
9. Рябов, А. В. Применение метода дискретных элементов для анализа динамики сыпучих материалов в смесителях // *Вестник ТГТУ*. – 2021. – № 4. – С. 56–63.

УДК 62-932.4

**Карпушкин С.В.<sup>1</sup>, Бухнина К.В.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: karp@mail.tstu.ru

<sup>2</sup>e-mail: kristina.bukhnina@bk.ru

## **СОСТАВ И СТРУКТУРА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЛИТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА**

**Karpushkin S.V.<sup>1</sup>, Bukhnina K.V.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: karp@mail.tstu.ru

<sup>2</sup>e-mail: kristina.bukhnina@bk.ru

## **COMPOSITION AND STRUCTURE OF THE HYDRAULIC PRESS HEATING PLATE'S DIGITAL TWIN**

*Аннотация.* Определен состав и структура цифрового двойника нагревательной плиты гидравлического пресса. Предполагается его использование в период проектирования при отсутствии физического аналога. Представлено текущее состояние физической, виртуальной и аналитической среды, среды данных разрабатываемого цифрового двойника. Предложена математическая модель процесса нагрева плиты до рабочей температуры, постановка задачи формирования температурного поля рабочей поверхности плиты.

*Ключевые слова:* цифровой двойник, гидравлический вулканизационный пресс, нагревательная плита, индукционный нагреватель, модель процесса нагрева, задача формирования температурного поля.

*Abstract.* Composition and structure the digital twin of a hydraulic press heating platen have been determined. Its use is envisaged during the design phase in the absence of a physical equivalent. The current state of the physical, virtual, and analytical environments, as well as the data environment of the digital twin being developed, is presented. A mathematical model for heating the platen to operating temperature is proposed, along with the problem of generating a temperature field for the platen's working surface.

*Keywords:* digital twin, hydraulic vulcanization press, heating plate, induction heater, heating process model, temperature field generation problem.

Прессовое оборудование получило широкое распространение в промышленности. Одной из основных областей его использования является вулканизация резинотехнических изделий в металлических пресс-формах. Нагревательные плиты

гидравлических вулканизационных прессов чаще всего оснащаются индукционными нагревателями.

Главное требование, предъявляемое к такому оборудованию – точность поддержания температуры нагрева рабочей поверхности плиты. Допустимый перепад температур по рабочей поверхности по истечении заданного времени обычно составляет  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ , однако в последнее время в технические задания на разработку прессов все чаще закладывается неравномерность  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Для выполнения этого требования предлагается разработать цифровой двойник нагревательной плиты гидравлического пресса – виртуальную модель, которая позволяет моделировать, анализировать и оптимизировать ее производительность на протяжении всего жизненного цикла.

Цифровой двойник изделия машиностроения включает, см. [1], физическую среду, виртуальную среду, среду данных, аналитическую среду и соединения. Физическая среда – это реальный объект (нагревательная плита) и установленные на нем датчики, которые фиксируют его состояние в режиме реального времени. Виртуальная среда представляет собой детальную цифровую модель изделия, созданную с использованием программного обеспечения для инженерного моделирования, и может включать 3D-модели, симуляции поведения и производительности. Среда данных – это массив информации о состоянии изделия (температуре, вибрации, давлении) а также исторические данные о работе и техническом обслуживании. Аналитическая среда включает алгоритмы анализа данных и виртуальной модели, позволяющие проводить диагностику, прогнозировать отказы, оптимизировать производительность. Соединения – это каналы обмена данными между физической и виртуальной средами.

Разрабатываемый цифровой двойник нагревательной плиты гидравлического пресса по уровню сложности [1] можно классифицировать как «двойник компонента» – виртуальная копия отдельного элемента или узла внутри сложной системы, а по уровню зрелости – как «предцифровой двойник», т.е. виртуальный прототип, который разрабатывается в период проектирования, до создания физического аналога и используется для принятия решений на начальных этапах разработки и тестирования.

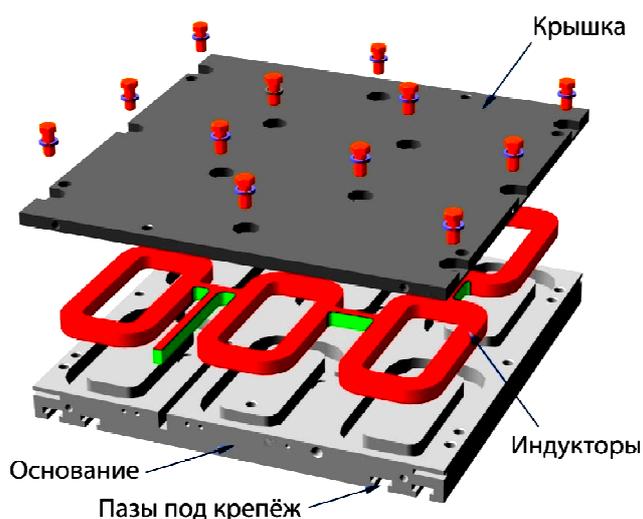


Рис. 1. 3D-модель плиты 432.383.35

Физическая среда цифрового двойника нагревательной плиты гидравлического пресса представляет собой реальную плиту индукционного нагрева, например выпускаемую АО «Тамбовполимермаш» плиту 432.383.35 размерами 600×600 мм с шестью индукторами, обеспечивающими суммарную среднюю мощность 6.5 кВт. Плита оснащена контрольной термопарой, соединенной с двухпозиционным регулятором температуры. Для

контроля перепада температур по ее рабочей поверхности может быть использован комплекс термопар, размещенных в коврик из паронита, который укладывается на поверхность плиты. Виртуальная среда в настоящее время включает только 3D-модель плиты, см. рис. 1, степень детализации которой необходимо увеличить.

В среду данных включены результаты заводских испытаний плиты: зависимость значения температуры в месте установки контрольной термопары от времени, см. рис. 2а, перепада температур по рабочей поверхности плиты, см. рис. 2б в период разогрева.

Аналитическая среда представлена математической моделью процесса нагрева плиты, постановкой и методикой решения задачи формирования температурного поля рабочей поверхности плиты. Математическая модель включает следующие соотношения.

1. Уравнение теплопередачи в нагревательной плите – нестационарное уравнение теплопроводности с внутренними источниками тепла [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{q}{c\rho}, \quad (1)$$

где  $T = T(x, y, z, \tau)$  – температура в точке объема плиты с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $\tau$ ;  $q = q(x, y, z, T_{av})$  – удельное тепловыделение в этой точке;

$T_{av} = T_{av}(\tau) = \frac{1}{h \cdot s \cdot l} \cdot \int_0^h \int_0^s \int_0^l T(x, y, z, \tau) dx dy dz$  – средняя температура плиты в момент

времени  $\tau$ ;

$a = \lambda / (c\rho)$  – коэффициент температуропроводности материала плиты;  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$  – коэффициент его теплопроводности, теплоемкость и плотность;  $h$ ,  $s$ ,  $l$  – высота, ширина и длина плиты.

Начальное условие для решения уравнения (1)

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды.

Теплоотдача от внешних неизолированных поверхностей нагревательной плиты описывается граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_r} = \alpha_r (T_r - T_0), \quad r = 1, \dots, 6, \quad (3)$$

где  $S_r$  – площадь  $r$ -й поверхности плиты: рабочая поверхность, крышка, торцы;  $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи от  $r$ -й поверхности плиты, см. [3];  $T_r$  – средняя температура  $r$ -й поверхности плиты в течение периода ее разогрева.

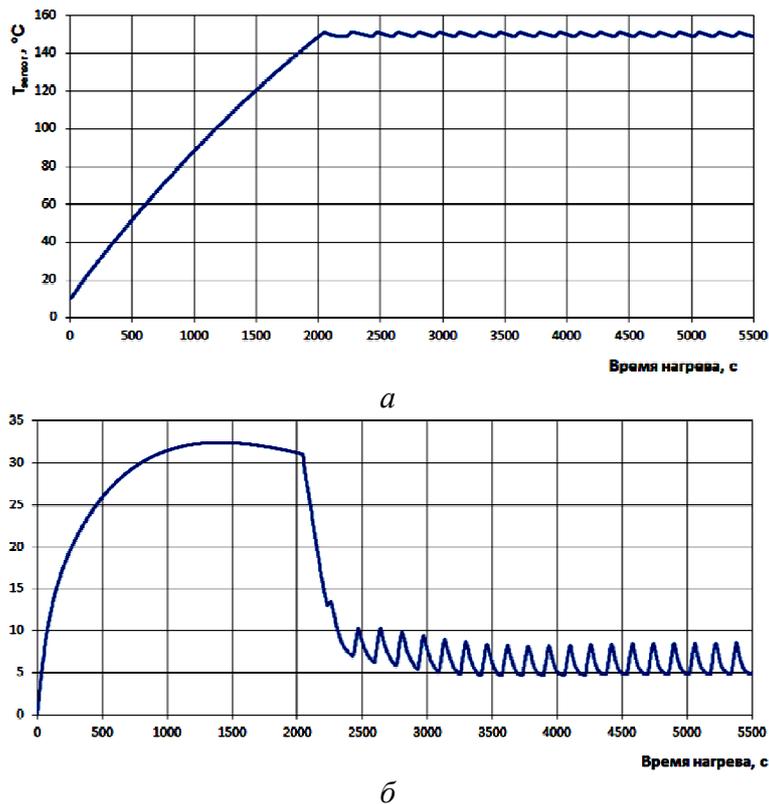


Рис. 2. Изменение температуры плиты 432.383.35 в месте установки контрольной термопары (а) и перепада температур по рабочей поверхности (б)

2. Зависимости интенсивности внутренних тепловыделений от координат и средней температуры плиты при допущении, что тепловыделение каждого индуктора осуществляется равномерно в объеме паза под него:

$$q(x,y,z) = \begin{cases} q_{av0i}, & \text{если } (x,y,z) \in v_i, i = 1, \dots, n_n, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

где  $q_{av0i}$  – средняя удельная мощность  $i$ -го индуктора за период  $[0, \tau_z]$ , см. [4].

3. Условие обеспечения необходимой суммарной мощности нагревателей с учетом требуемого темпа нагрева плиты и условий стабилизации ее температуры:

$$\sum_{i=1}^{n_n} Q_i \geq \frac{l \cdot s \cdot h \cdot \rho}{\tau_z} \int_{T_0}^{T_z} c(T) dT + \sum_{r=1}^6 \alpha_r S_r (T_r - T_0), \quad (5)$$

где  $T_z$  – заданная рабочая температура плиты.

Постановка задачи формирования температурного поля рабочей поверхности плиты предусматривает определение числа индукторов ( $N_n$ ) заданной формы (круглый, прямоугольный), их размеров (длина  $l_n$  и ширина  $s_n$ , или диаметр  $d_n$ ), положение проекций центров индукторов на рабочую поверхность плиты ( $X_n, Y_n$ ), и числа витков ( $n_n$ ) провода каждого индуктора при заданных материале, внешнем диаметре  $d_n$  (с учетом изоляции) и диаметре  $d$  сечения, при которых в момент времени  $\tau_n$  от начала нагрева средняя температура рабочей поверхности плиты минимально отличается от

заданной ( $T_p$ ), а неравномерность поля температур рабочей поверхности  $\max\{T_p(x,y,0,\tau_n)\} - \min\{T_p(x,y,0,\tau_n)\}$  не превосходит максимально допустимой  $\Delta T_p$ . Таким образом, задача состоит в минимизации значения разности

$$T_p - T_{av}(\tau_n) \quad (6)$$

при условиях (1)-(5) и дополнительных ограничениях:

- на геометрические размеры нагревателей и положение их проекций на рабочую поверхность плиты

$$\mathbf{X}_{ni} \in [\mathbf{X}_{ni}^*, \mathbf{X}_{ni}^*], i = 1, \dots, n_n, \quad (7)$$

где  $\mathbf{X}_{ni}$  – вектор параметров  $i$ -го нагревателя, например, для прямоугольного индуктора  $\mathbf{X}_{ni} = (l_{ni}, s_{ni}, xc_{ni}, yc_{ni})$  – длина и ширина проекции  $i$ -го индуктора на рабочую поверхность плиты, координаты проекции его центра на рабочую поверхность относительно левого нижнего угла.

- на суммарную мощность нагревателей

$$\sum_{i=1}^{n_n} Q_{ni} \leq Q_{\max}; \quad (8)$$

- на размещение пазов под нагреватели в объеме плиты

$$V_i \cap V_j = \emptyset, i, j = 1, \dots, n_n, i \neq j, \quad (9)$$

где  $V_i$  – объем паза  $i$ -го нагревателя и окрестности, включающей минимально допустимые расстояния между пазами соседних нагревателей, пазом нагревателя и границами рабочей поверхности плиты;

- на перепад температур по рабочей поверхности плиты

$$\max_{\substack{x \in [\Delta p, l - \Delta p], \\ y \in [\Delta p, s - \Delta p], \\ \tau \in [\tau_n, \tau_c]}} \{T(x, y, u, \tau)\} - T_z \leq \Delta T_p, \quad T_z = \min_{\substack{x \in [\Delta p, l - \Delta p], \\ y \in [\Delta p, s - \Delta p], \\ \tau \in [\tau_n, \tau_c]}} \{T(x, y, u, \tau)\} \leq \Delta T_p, \quad (10)$$

где  $\Delta p$  – расстояние от края плиты до границы ее рабочей поверхности,  $\tau_c$  – продолжительность периода стабилизации температурных полей элементов системы нагрева,  $T(x, y, z, \tau)$  – значение температуры в точке  $(x, y, z)$  объема плиты в момент времени  $\tau$ ,  $u = 0$ , если рабочей является нижняя поверхность плиты и  $u = h$  (высоте плиты), если верхняя,  $\Delta T_p$  – допустимое значение перепада температур по рабочей поверхности плиты;

- на длину провода индуктора

$$nv_i \leq 4 \cdot b_i \cdot g_i \cdot \chi_i \cdot \pi^{-1} \cdot di_i^{-2}, i = 1, \dots, n_n, \quad (11)$$

где  $nv_i$  – число витков провода в индукторе,  $b_i, g_i$  – ширина и глубина паза соответственно,  $di_i$  – диаметр провода с учетом изоляции,  $\chi_i$  – максимально допустимый коэффициент заполнения паза проводом;

Одна из возможных методик решения этой задачи представлена в [5].

Таким образом, для завершения разработки «предцифрового двойника» нагревательной плиты гидравлического пресса необходимо создать программный модуль формирования детализированной параметрической 3D-модели плиты, собрать и представить в виде базы данных сведения о результатах заводских испытаний нагревательных плит промышленных вулканизационных прессов, определиться с методикой решения задачи (6), (1)-(5), (7)-(11).

#### Список использованных источников

1. Крылов, А.Н. Цифровые двойники в промышленности. Возможности и перспективы / А.Н. Крылов // Ритм машиностроения. – 2021. – № 2. – С. 30-34.
2. Кошляков, Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1970. – 712 с.
3. Романков, П.Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, О.М. Флисюк, М.И. Курочкина. – СПб: Химия, 1998. – 496 с.
4. Глебов, А.О. Методика определения мощности индукционных нагревательных устройств / А.О. Глебов, А.В. Стрижков// Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27: сб. трудов XXVII междунар. науч. конф. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2014. – Т. 3. – С. 9-11.
5. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
6. Глебов, А.О. Методика оптимизации режимных и конструктивных характеристик нагревательной плиты вулканизационного пресса / А.О. Глебов, С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Вестник ТГТУ. – 2013. – Т.19, №1. – С.137-151.

УДК 004.008

**Шабунин Д.А.<sup>1</sup>, Немтинов В.А.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: sabunindima2001@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДСТВ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ  
ДЫХАНИЯ**

**Shabunin D.A.<sup>1</sup>, Nemtinov V.A.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: sabunindima2001@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**IMPROVEMENT OF THE DESIGN AND MANUFACTURING TECHNOLOGY  
OF PERSONAL RESPIRATORY PROTECTION EQUIPMENT**

*Аннотация.* В статье рассматривается исследование новейших достижений и перспективных направлений совершенствование конструкций и функциональных средств защиты органов дыхания – самоспасателей. Были рассмотрены такие вопросы как, внедрение современных материалов, прогрессивных технических решений и цифровых технологий, повышение безопасности и надежности изделий. Особое внимание уделено улучшению защитных функций и адаптации конструкций к различным условиям.

*Ключевые слова:* самоспасатель, современные технологии, надежность, развитие новых технологий.

*Abstract.* This article examines the latest advances and promising areas for improving the design and functionality of respiratory protective devices (self-rescuers). Issues such as the introduction of modern materials, advanced technical solutions, and digital technologies, as well as improving the safety and reliability of products, are explored. Particular attention is paid to improving protective functions and adapting designs to various conditions.

*Keywords:* self-rescuer, modern technologies, reliability, development of new technologies.

Проблемой развития органов дыхания является одной из важнейших в современной технике безопасность. Самоспасатель – средство индивидуальной защиты органов дыхания для эвакуации из опасной атмосферы, характеризующиеся наличием биологических и химических факторов, уровень которых превышает установленные

нормативы. Постоянно растет сложность производственных процессов требующих постоянного улучшения конструкций и функциональных характеристик самоспасателей. Актуальность проблемы заключается в необходимости обеспечении надежности защиты дей в условиях чрезвычайной ситуации.[1].

Цель работы рассмотреть совершенствование конструкции технологии изготовления средств индивидуальной защиты органов дыхания.

Изначально конструкции были примитивными и состояли из тканевого чехла с простейшими фильтрующими элементами. По мере роста промышленных рисков появились специализированные изолирующие самоспасатели, использовавшие замкнутый цикл регенерации воздуха с кислородным патроном. Сегодня существует большое разнообразие моделей, различающихся конструкцией, материалами исполнения и принципами действия.[2].

Давайте рассмотрим возможные тенденции совершенствования самоспасателей:

- Улучшение сборок и материала входящих в них;
- Увеличение времени использования самоспасателей;
- Внедрение инновационных материалов с особыми характеристиками;
- Создание умных самоспасателей с функциями оповещения и дистанционного мониторинга.

Рассмотрим наиболее подходящий материал для изменения корпуса самоспасателя, и это углепластик.

Углепластик — композиционный материал, состоящий из углеродных волокон и полимерной матрицы. Сейчас чаще всего для корпуса применяется сталь 12Н18Т10, ниже представлена таблица 1 сравнения углепластика и стали 12Н18Т10:

Таблица 1. Сравнительные характеристики углепластика и стали 12Н18Т10

Параметр	Углепластик	Сталь 35
Плотность (кг/м <sup>3</sup> )	1500—2000	7800
Прочность на разрыв (МПа)	2000—4000	700
Модуль Юнга (ГПа)	150—400	200
Модуль упругости (ГПа)	150—400	200
Коэффициент Пуассона	0,2—0,3	0,3
Теплопроводность (Вт/(м·К))	низкая (0,1—1)	высокая (50)
Электропроводность (См/м)	хорошая	отличная
Коррозионная стойкость	Не ржавеет	3-5 лет
Стоимость (\$/кг)	высокая	низкая

Углепластик характеризуются низким удельным весом, хорошей механической прочностью и сопротивляемостью внешним факторам (температура, химическое воздействие). Сталь имеет хорошую плотность, но за счет этого сильно повышается масса конструкции. Самоспасатели в шахте хранятся в пунктах переключения в

самоспасатели что позволяет исключить сильные механические повреждения. Расчет массы конструкции можно представить следующей формулой:

$$m_{\text{общ}} = m_{\text{корпуса}} + m_{\text{вентиляц}}, \quad (1)$$

где:  $m_{\text{общ}}$  — общая масса самоспасателя;  $m_{\text{корпуса}}$  — масса корпуса;  $m_{\text{вентиляц}}$  — масса вентиляционной системы.

Выбор материала влияет на массу и размеры изделия, следовательно, подбор оптимальной композиции материалов играет ключевую роль в снижении общей массы, повышение прочности и коррозионных свойств конструкции.[4].

Фильтрующая способность является одним из определяющих показателей качества самоспасателя. Традиционные фильтры, выполненные на основе волокнистых материалов, имеют ограниченную пропускную способность и недостаточно эффективно задерживают мелкие частицы. Рассмотрим применение мембран, изготовленных методом электростатической обработки, и синтетических нитей с регулируемой пористостью. Эффективность фильтра определяется коэффициентом очистки  $\eta$ , рассчитываемым по формуле:

$$\eta = \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} * 100\%; \quad (2)$$

где:  $C_{\text{in}}$  — концентрация загрязнителя на входе фильтра;  $C_{\text{out}}$  — концентрация загрязнителя на выходе фильтра.

Оптимальная структура фильтра достигается путем расчета оптимального размера частиц наполнителей и формы ячейки сетки фильтра.

Электронные системы мониторинга и управления становятся неотъемлемой частью конструкции современных самоспасателей. Их задача — контроль за состоянием внутренней среды и своевременное информирование пользователя о возможных угрозах. Среди главных компонентов электронных систем выделяют датчики газа, температуры, давления и оптические индикаторы. Для оценки надежности электронных систем используется показатель средней наработки на отказ  $T_{BF}$ , вычисляемый по формуле:

$$T_{BF} = \frac{\sum ti}{n}; \quad (3)$$

где:  $\sum ti$  — продолжительность работы каждого компонента до отказа;  $n$  — количество испытаний.

Использование микропроцессорных схем позволяет реализовать сложные алгоритмы принятия решений и сократить задержки реагирования на изменения условий эксплуатации.[3].

В настоящее время совершенствуется конструкция и технология изготовления отдельных элементов изделия Spirox 70. Spirox 70 предназначен для защиты органов дыхания и зрения промышленного персонала (также подземного персонала шахт) при авариях, связанных с образованием непригодной для дыхания атмосферы, в том числе в

атмосфере с пониженным содержанием кислорода. Spirox 70 является одноразовым изолирующим средством индивидуальной защиты органов дыхания с химически связанным кислородом, выпускается готовым к немедленному применению людьми старше 16 лет и рассчитан на индивидуальное постоянное ношение на ремне (поясном или плечевом) или групповое хранение в местах эксплуатации.

Можно сделать вывод о значительных успехах в сфере развития самоспасателей. Улучшение в виде замены корпусных составляющих конструкции и применение мембран в фильтрующей системе средств индивидуальной защиты органов дыхания. Правильное использование и регулярное техническое обслуживание позволяет минимизировать риски для здоровья и жизни шахтеров.

#### Список использованных источников

1. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты органов дыхания. Термины, Определения, Обозначения: ГОСТ Р 12.4.233-2023. – Изд. июнь. 2023 – Взамен ГОСТ Р 12.4.233-2012; введ. 01.01.98.

2. Теплоаккумулирующий материал с изменением фазового состояния для кислородного самоспасателя нового поколения / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, Э. И. Симаненков [и др.] // Российский химический журнал. – 2013. – Т. 57, № 1. – С. 109-119.

3. Батырев, В. В. Современная система требований к самоспасателям - малогабаритным фильтрующим средствам защиты органов дыхания населения в чрезвычайных ситуациях / В. В. Батырев, В. И. Грачев // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2021. – № 1. – С. 56-65.

4. Углепластики в современном мире: их свойства и применения / С. С. Малаховский, А. Н. Панафидникова, Н. В. Костромина, В. С. Осипчик // Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33, № 6(216). – С. 62-64.

УДК 004.9

**Бредищева О.Ф.**

Тамбовский государственный технологический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: obred17@yandex.ru

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ  
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ  
АДАПТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ**

**Bredishcheva O.F.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: obred17@yandex.ru

**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC PROTECTION SYSTEM FOR HEAT  
EXCHANGERS BASED ON MULTI-LEVEL ADAPTIVE DIAGNOSTICS**

*Аннотация.* В статье рассматривается проблема высокой аварийности теплообменных аппаратов в промышленных условиях. Проводится анализ слабых сторон существующих релейных систем защиты. В качестве альтернативы предлагается создание концепции автоматизированной системы безопасности, основанной на принципах многоступенчатой адаптивной диагностики. Ожидаемым результатом внедрения является снижение количества аварий на 40-50% и увеличение времени между плановыми ремонтами на 25-30%.

*Ключевые слова:* теплообменные аппараты, автоматическая система защиты, многоуровневая система, адаптивная диагностика, прогнозирование отказов.

*Abstract:* The article discusses the problem of high accident rate of heat exchangers in industrial conditions. The analysis of the weaknesses of the existing relay protection systems is carried out. As an alternative, it is proposed to create a concept for an automated security system based on the principles of multi-stage adaptive diagnostics. The expected result of the implementation is a reduction in the number of accidents by 40-50% and an increase in the time between scheduled repairs by 25-30%.

*Keywords:* heat exchangers, automatic protection system, multilevel system, adaptive diagnostics, prediction of failures.

*Введение*

В современных промышленных условиях сохранение безопасной эксплуатации теплообменных аппаратов, по-прежнему остается чрезвычайно актуальной задачей. Статистика Ростехнадзора свидетельствует, что до 30% всех внеплановых остановок производственных линий происходят из-за отказов теплообменного оборудования [1].

Наиболее серьезные последствия возникают при разгерметизации теплообменного оборудования, работающих под высоким давлением с использованием агрессивных или токсичных сред.

Современные системы защиты преимущественно построены на релейной логике и контроле пороговых значений, что влечет за собой ряд существенных недостатков [2]:

- отсутствие возможности прогнозирования постепенно развивающихся отказов;
- высокий уровень ложных срабатываний;
- ограниченный перечень контролируемых параметров.

*Целью статьи* является разработка концепции автоматизированной системы защиты теплообменных аппаратов, основанной на принципах многоуровневой адаптивной диагностики, обеспечивающей своевременное обнаружение и предотвращение аварийных ситуаций.

Существующие системы защиты имеют серьезные недостатки, включая неспособность к прогнозированию развивающихся отказов, высокий уровень ложных срабатываний и отсутствие адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Предлагаемая концепция заключается в создании интеллектуальной системы защиты, основанной на принципах многоуровневой адаптивной диагностики.

В системе реализована четырехуровневая структура диагностики [3]:

- 1) базовый мониторинг, непрерывный мониторинг критических параметров (давление, температура, расход);
- 2) анализ тенденций, выявление медленно развивающихся дефектов и аномалий;
- 3) прогнозирование, оценка остаточного ресурса и прогноз развития отказов;
- 4) управление, принятие обоснованных решения об активации защиты.

Главной особенностью системы является адаптивность, проявляющаяся в:

- динамической корректировке порогов срабатывания;
- учете изменяющихся условий эксплуатации;
- непрерывном обучении на основе накопленных данных.

Система включает многоуровневую структуру датчиков, а также комплекс программных модулей:

- модуль сбора и обработки данных в реальном времени;
- нейросетевой анализатор для классификации состояний;
- базу знаний с историческими данными и прецедентами;
- систему адаптивного управления защитными функциями.

Алгоритмы диагностики реализуются поэтапно: первый уровень – это алгоритм оперативного обнаружения аварий, второй - метод корреляционного анализа для выявления скрытых зависимостей, третий - машинное обучение для прогнозирования отказов, четвертый - нечеткая логика для принятия решений.

Система обеспечивает выполнение диагностических функций, включая раннее обнаружение коррозионных повреждений, обнаружение загрязнений теплообменных поверхностей, прогнозирование механических повреждений и автоматическое управление защитными устройствами.

Эксплуатационные преимущества системы включают:

- снижение аварийности на 40-50%;
- увеличение межремонтного периода на 25-30%;
- повышение общей надежности системы.

*Заключение*

Разработана структура автоматической системы защиты теплообменного оборудования на основе многоуровневой адаптивной диагностики, что существенно повышает надежность эксплуатации теплообменного оборудования.

Результаты работы будут использованы при разработке системы автоматизированного проектирования технологического оборудования [4-6] и обучения студентов [7].

Список использованных источников

1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Статистика технологических нарушений за 2021-2023 гг. - М.: Ростехнадзор, 2023. - 128 с.
2. Схиртладзе, А.Г. Автоматизация технологических процессов и производств: Учебник/ А.Г. Схиртладзе, А.В. Федотов, В.Г. Хомченко. – М.: Абрис, 2018. – 565 с.
3. Иванов С.П. Современные системы защиты технологического оборудования: преимущества и недостатки // Автоматизация в промышленности. - 2020. - № 6. - С. 34-41.
4. Мокрозуб, В. Г. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника / В. Г. Мокрозуб, А. А. М. Альсаиди // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 4(54). – С. 595-606. – DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606. – EDN DNJZFN.
5. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364-373. – DOI 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373.
6. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326-331. – DOI 10.1007/s10556-017-0342-6. – EDN XNSPGA.
7. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

УДК 004.9

**Попов С.В., Немтинов В.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: lev\_tmb@mail.ru

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЩИТАХ**

**Popov S.V., Nemtinov V.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: lev\_tmb@mail.ru

**USING SYSTEM ANALYSIS FOR OPTIMIZING PRODUCTION PROCESSES  
IN ELECTRICAL PANELS**

*Аннотация.* Авторами рассмотрены вопросы решения задачи применения методов системного анализа для повышения эффективности и надежности процессов производства электрощитового оборудования. Предложена методика оптимизации производственных процессов с использованием системного анализа, который учитывает все аспекты – от проектирования и материаловедения до логистики и управления качеством. В работе проведено изучение существующих производственных процессов, идентифицированы основные проблемы и узкие места, мешающие эффективной работе.

*Ключевые слова:* оптимизация производства, анализ производственных процессов, моделирование процессов, анализ потоков, интегрированный подход, системный анализ.

*Abstract.* The authors considered the issues of solving the problem of applying system analysis methods to enhance the efficiency and reliability of the production processes for electrical switchboard equipment. A proposed methodology for optimizing production processes using system analysis takes into account all aspects—from design and materials science to logistics and quality management. The paper analyzes existing production processes, identifying the main problems and bottlenecks that hinder effective operations.

*Keywords:* optimization of production, analysis of production processes, process modeling, flow analysis, integrated approach, systems analysis.

Современное производство в электротехнической отрасли сталкивается с постоянными изменениями технологических требований и усилением конкуренции, что ставит задачу оптимизации производственных процессов в число первоочередных. В данном докладе рассматривается применение системного анализа для повышения эффективности и надёжности производства электрощитов.

Цель работы заключается в разработке системного подхода к оптимизации процессов, который охватывает все стадии, начиная от проектирования и выбора материалов до логистики и контроля качества. В ходе исследования был выполнен комплексный анализ текущих производственных процессов, выявлены ключевые проблемы и узкие места, которые препятствуют более эффективной работе предприятия ООО «НПК ТОКОВОЛЬТ».

Процесс производства электрощитов включает несколько основных этапов: проектирование, закупка материалов, сборка, тестирование и отгрузка готовой продукции. На каждом из этих этапов могут возникать препятствия, замедляющие выполнение заказов и ухудшающие качество продукции. Одной из главных проблем является высокий процент брака и возвратов, что связано с недостаточной проверкой качества на различных стадиях производства или с низким качеством поставляемых материалов. Кроме того, продолжительные задержки между этапами производства увеличивают сроки исполнения заказов, что негативно сказывается на удовлетворенности клиентов. Определение причин этих задержек и разработка мер по их устранению являются важными задачами для улучшения общего функционирования производства. Существующие технологии и применение автоматизации способны значительно улучшить производственные процессы на предприятии. Основные технологии, которые нужно внедрять:

- системы управления производственными процессами — позволяют контролировать и оптимизировать процессы в реальном времени;
- автоматизированные линии сборки — могут снизить количество ошибок и ускорить процесс сборки;
- системы контроля качества — внедрение технологий байпасного контроля и оперативной проверки качества может значительно снизить показатель брака.

Разработка системы показателей производственных процессов одно из важнейших этапов. Система ключевых показателей эффективности (KPI), предложено формализовать набор ключевых показателей, который позволит целостно оценивать производственные процессы. Основная цель определения KPI — дать возможность руководству организации получать достоверную информацию о текущем состоянии дел на производстве, выявлять узкие места и принимать обоснованные решения для улучшения. Каждый KPI должен быть конкретным, измеримым, достижимым, релевантным и временным. Например, процент выполнения производственного плана, среднее время выполнения заказа, уровень отказов продукции.

Для эффективного управления производственными процессами необходимо использовать методы и инструменты моделирования, которые помогут визуализировать и рассмотреть потоки ресурсов, изменение последовательности операций или внедрение новых технологий.

Использование системного анализа для оптимизации производственных процессов в электрощитах открывает новые возможности для повышения эффективности и конкурентоспособности бизнеса. Комплексный подход позволяет не только улучшить

текущие процессы, но и создать устойчивую систему, готовую к изменениям в условиях рынка.

Проектирование электроустановок любого напряжения в конечном итоге всегда связано с выбором электрооборудования. От него зависят технико-экономические показатели, надежность и эффективность эксплуатации СЭС производственных объектов. Поэтому одним из основных вопросов оптимального проектирования СЭС промышленных объектов является выбор электрооборудования, соответствующего характеристикам электрических сетей, параметрам и режимам работы электроприемников, условиям эксплуатации с учетом состояния окружающей среды.

Условия окружающей среды в производственных помещениях и зонах, в которых размещается технологическое и связанное с ним электротехническое оборудование, определяются температурой воздуха, влажностью, наличием агрессивных газов и пыли, возможностью возникновения условий взрывов и пожароопасности.

При проектировании и эксплуатации электроустановок необходимо обеспечивать совместимость электрооборудования с окружающей средой. Для этого электрооборудование должно быть исполнено в соответствии с климатическими условиями местности, местом размещения и требуемой степенью защиты от попадания твердых посторонних предметов, пыли и воды. При выборе электротехнических изделий и оборудования следует учитывать климатические условия района, в котором предполагается сооружение промышленного объекта. Применение электрооборудования, не соответствующего реальному климату, может привести к увеличению затрат на сооружение и эксплуатацию системы электроснабжения и преждевременному выходу из строя отдельных ее элементов. Поэтому электротехнической промышленностью выпускаются изделия в различных климатических исполнениях.

Исходными данными при расчете электрооборудования являются их технические характеристики и электрические нагрузки элементов электрических сетей. Электрические аппараты выбираются по следующим показателям: функциональному назначению; номинальному напряжению; номинальному току; номинальной мощности; частоте тока; коммутационной износостойкости; предельной отключающей способности; исполнению защиты от воздействия окружающей среды; климатическому исполнению. Электрооборудование (панели, силовые пункты, шинопроводы и т. п.) проверяются на электродинамическую стойкость к действию тока короткого замыкания (КЗ) по условию:

$$I_{\text{дин}} \geq I_y \quad (1)$$

где  $I_{\text{дин}}$  – ток электродинамической стойкости панели, силового пункта, шинопровода (предельный ток отключения аппарата), кА;  $I_y$  – ударный ток КЗ в точке установки электрооборудования, кА. Аппараты управления выбираются с учетом режима работы и вида электроприемников, для которых они предназначены. В зависимости от этого установлены категории их применения.

Комплектное оборудование и электрические аппараты напряжением до 1 кВ, входящие в его состав, выбираются в зависимости от значений расчетных параметров (напряжения, тока, мощности, частоты и т. п.). В общем случае номинальное значение расчетного параметра  $X_{ном}$  должно удовлетворять условию:

$$X_{ном} \geq KX_p \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент, величина которого принимается в зависимости от ряда факторов (допустимой перегрузки, температуры нагрева и т. п.),  $1 < K \leq 1$ ;  $X_p$  – расчетное значение параметра (напряжения, тока, частоты и т. д.).

По функциональному назначению электрические аппараты выбираются при разработке схем электрических сетей электроустановок, в процессе которой с учетом соответствующих условий и требований нормативно-технических документов предусматриваются необходимые коммутационные и защитные аппараты.

По номинальному напряжению выбор электрооборудования производится по условию:

$$U_{ном \ э} \geq U_{ном \ с} \quad (3)$$

где  $U_{ном \ э}$  и  $U_{ном \ с}$  – номинальное напряжение электрооборудования и электрической сети соответственно.

Выбор аппарата по номинальному току выполняется по выражению

$$I_{ном} \geq I_p \quad (4)$$

где  $I_{ном}$  и  $I_p$  – номинальный и расчетный (рабочий) ток аппарата соответственно.

Если в процессе эксплуатации возможны длительные перегрузки аппарата, то он выбирается по току в послеаварийном режиме  $I_{ра}$  с учетом коэффициента допустимой перегрузки  $K_{п}$ :

$$K_{п} I_{ном} \geq I_{ра} \quad (5)$$

При выборе автоматических выключателей необходимо учитывать их основные технические характеристики: номинальное напряжение  $U_{ном}$ , В; номинальный ток выключателя  $I_{ном \ а}$ , А; номинальный ток расцепителя  $I_{ном \ р}$ , А; уставка срабатывания (ток срабатывания) расцепителя  $I_{ср.р}$  при токе КЗ, которая указывается в виде абсолютного числа (А) или кратности тока отсечки по отношению к номинальному току теплового расцепителя; предельная отключающая способность (предельно допустимое значение отключаемого тока КЗ)  $I_{пр \ а}$ , кА; защитная (времятоковая) характеристика, отражающая зависимость времени срабатывания выключателя от кратности тока нагрузки по отношению к номинальному току расцепителя. Номинальные токи автоматического выключателя  $I_{ном \ а}$  и его расцепителя  $I_{ном \ р}$  выбираются по следующим условиям:

$$I_{ном \ а} \geq I_p \quad (6)$$

$$I_{ном \ р} \geq I_p \quad (7)$$

где  $I_p$  – длительный рабочий (в условиях эксплуатации) или расчетный (при проектировании) ток в защищаемой электрической цепи, А.

Как видно из обозначенных проблем выше, электрощитовая сборка на современных предприятиях – это сложный комплексный процесс, состоящий из стадий,

которые должны быть регламентированы. В настоящее время с участием авторов проводятся работы по интеграции на уровне «производитель – проектный институт» или «производитель – конечный потребитель». Они реализуются на уровне аri складских остатков и прайсовой (базовой) стоимости оборудования. При этом данная информация будет доступна заказчику в любое время, тем самым делая поставку и производство прозрачнее. Эффективность системного подхода, можно рассмотреть на примере одной сборки щита управления котельной (см. табл. 1). Для удобства в таблице материал разбит на группы и указан производитель.

Таблица 1. Стоимость материала без и с проектной работой

Группа материала, производитель	Стоимость без проектной работы, руб.	Стоимость с проектной работой, руб.
Оболочка щита, ДКС	78000	55000
Низковольтное оборудование, КЭАЗ	64000	50000
Средства автоматизации, SE	80000	62000
Светосигнальное оборудование и реле, SE	8000	6400
Итого	230000	173400
% экономии	24,6	

Как видно из таблицы 1 при долгосрочной системной проработке проектов можно добиться значительной экономии, которая позволит быть конкурентоспособным и экономически выгодным подрядчиком при прочих равных условиях.

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Кузнецов, В. В. Системный анализ : учебник и практикум для вузов / В. В. Кузнецов, А. Ю. Шатраков ; под общей редакцией В. В. Кузнецова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 327 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-20387-5.
3. Заграновская, А. В. Системный анализ : учебник для вузов / А. В. Заграновская, Ю. Н. Эйснер. — Москва : Издательство Юрайт, 2025. — 412 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-19867-6.
4. Романова О. Г. Интеграция интеллектуальных моделей и технологий анализа больших данных в управлении предприятиями / О. Г. Романова // Проблемы экономики и менеджмента. № 2. С. 103—118.
5. Выбор электрооборудования систем электроснабжения промышленных предприятий : пособие для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» / В. Н. Радкевич, В. Б. Козловская, И. В. Колосова. – Минск : БНТУ, 2017. – 172 с. — ISBN 978-985-550-912-8.

УДК 629.7.05

**Каштанов В.В.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебный и  
испытательный), Россия, г. Тамбов  
e-mail: slavakashtanov302@gmail.com

## **ГИБРИДНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Kashtanov V.V.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
Interspecific Center for Training and Combat use of Electronic Warfare Troops,  
Russia, Tambov  
e-mail: slavakashtanov302@gmail.com

## **HYBRID NAVIGATION SYSTEMS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES**

*Аннотация.* В статье рассматривается актуальная проблема обеспечения непрерывного и точного позиционирования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях неполной доступности или полного отсутствия сигналов глобальных спутниковых навигационных систем (GNSS). Предложен подход к построению гибридных навигационных систем, интегрирующих спутниковые, инерциальные, наземные и междроновые технологии. Особое внимание уделено анализу преимуществ и ограничений каждого из компонентов, а также алгоритмам их совместного использования в рамках единого навигационного фильтра. Приводятся сравнительные характеристики различных технологий позиционирования и обсуждаются перспективные направления развития гибридных систем, включая применение квантовых сенсоров и методов искусственного интеллекта. Показано, что комбинирование разнородных источников навигационной информации позволяет существенно повысить отказоустойчивость и точность работы БПЛА в сложных условиях, таких как урбанизированные территории, зоны радиоэлектронного подавления и закрытые помещения.

*Ключевые слова:* гибридные навигационные системы, беспилотные летательные аппараты, GNSS, инерциальная навигационная система, междроновая сеть, отказоустойчивость, сенсорное слияние, фильтр Калмана, позиционирование, радиоэлектронное подавление.

*Abstract.* The article discusses the urgent problem of ensuring continuous and accurate positioning of unmanned aerial vehicles (UAVs) in conditions of incomplete availability or complete absence of signals from global satellite navigation systems (GNSS). An approach to

the construction of hybrid navigation systems integrating satellite, inertial, terrestrial and inter-drone technologies is proposed. Special attention is paid to the analysis of the advantages and limitations of each component, as well as algorithms for their joint use within a single navigation filter. Comparative characteristics of various positioning technologies are given and promising directions for the development of hybrid systems, including the use of quantum sensors and artificial intelligence methods, are discussed. It is shown that the combination of heterogeneous sources of navigation information can significantly increase the fault tolerance and accuracy of UAV operation in difficult conditions, such as urbanized territories, electronic jamming zones and enclosed spaces.

*Keywords:* hybrid navigation systems, unmanned aerial vehicles, GNSS, inertial navigation system, neural network, fault tolerance, sensor fusion, Kalman filter, positioning, electronic jamming.

Современные беспилотные авиационные системы в значительной степени зависят от глобальных спутниковых навигационных систем, таких как GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou. Эти системы обеспечивают базовое позиционирование за счет приема и обработки сигналов от орбитальных аппаратов, что позволяет определять координаты с точностью до нескольких метров в стандартном режиме. Применение дифференциальных методов коррекции, включая RTK (Real – Time Kinematic), повышает точность до сантиметрового уровня, что критически важно для задач, требующих высокой точности, таких как картографирование и мониторинг инфраструктуры.

Однако спутниковые системы сталкиваются с рядом существенных ограничений. В условиях плотной городской застройки, где многоэтажные здания формируют так называемые «городские каньоны», наблюдается эффект многолучевого распространения сигналов, что приводит к значительному увеличению погрешности позиционирования. Кроме того, в современных мегаполисах всё более острой становится проблема искусственного создания радиопомех, направленных на подавление спутниковых сигналов. Такое целенаправленное глушение, часто осуществляемое с помощью компактных устройств, которое может полностью нарушать работу навигационных приемников на обширных территориях, создавая серьезные риски для систем безопасности транспорта, логистики и критической инфраструктуры. В лесистой и горной местности естественные препятствия, такие как деревья и рельеф, могут полностью блокировать спутниковый сигнал. Кроме того, атмосферные явления, включая ионосферные задержки, вносят дополнительные погрешности, особенно в низких широтах [1].

Несмотря на эти ограничения, спутниковые системы остаются основой для большинства навигационных решений благодаря их глобальному покрытию и независимости от наземной инфраструктуры. Однако для задач, требующих работы в сложных условиях, таких как урбанизированные территории или зоны с ограниченной видимостью неба, необходимо дополнение другими технологиями. Таким образом,

ключевой научно-технической проблемой является создание отказоустойчивых навигационных систем, способных обеспечивать непрерывное и точное позиционирование в условиях неполной наблюдаемости GNSS – сигналов [2, 3].

Для компенсации недостатков спутниковых систем разработаны наземные навигационные решения, обеспечивающие высокую точность в локальных зонах. К ним относятся сети корректирующих RTK – станций, которые передают поправки к спутниковым сигналам, повышая точность позиционирования до 1 – 3 см в радиусе 20 – 40 км. Альтернативным решением являются ультраширокополосные (UWB) метки, которые обеспечивают позиционирование с точностью до 10 см в закрытых помещениях или на ограниченных территориях, таких как склады или промышленные площадки. Эти технологии активно используются для навигации складских БПЛА и роботов.

Перспективным направлением является использование инфраструктуры сотовых сетей пятого поколения (5G) для навигации. За счет триангуляции сигналов от вышек сотовой связи возможно определение местоположения с точностью 5 – 10 м, что делает эту технологию привлекательной для городских применений. Однако наземные системы имеют существенный недостаток – ограниченную зону покрытия, что требует развертывания дополнительной инфраструктуры и сопряжено со значительными затратами.

Инерциальные навигационные системы (ИНС) представляют собой автономные комплексы, функционирующие на основе законов механики Ньютона – Эйлера и не требующие внешних источников информации [4, 5].

Принцип действия ИНС основан на измерении кажущегося ускорения и угловой скорости объекта в связанной системе координат. Для определения координат, скорости и ориентации выполняется численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, учитывающей преобразование координат, вращение Земли и её кривизну. Упрощённо процесс сводится к двойному интегрированию ускорения, скорректированного с учётом гравитации и ориентации, на практике же применяются более сложные алгоритмы.

Современные инерциальные системы подразделяются на два основных типа:

Таблица 1. Сравнительные характеристики платформенных и бесплатформенных ИНС

Параметр	Платформенные ИНС (ПИНС)	Бесплатформенные ИНС (БИНС)
Точность	Высокая	Средняя/низкая
Габариты	Большие	Компактные
Устойчивость к вибрациям	Низкая	Высокая
Энергопотребление	Высокое	Низкое
Стоимость	Высокая	Средняя/низкая
Углы измерения	Ограниченные	Неограниченные
Применение	Критичные системы	Массовые применения

Платформенные ИНС характеризуются размещением измерительных элементов (акселерометров и гироскопов) на гиостабилизированной платформе, что обеспечивает высокую точность измерений. Они подразделяются на геометрические, аналитические и полуаналитические типы.

Бесплатформенные ИНС (БИНС) получили широкое распространение в современных БПЛА благодаря компактности, устойчивости к вибрациям и низкому энергопотреблению. В таких системах акселерометры и гироскопы жестко связаны с корпусом летательного аппарата, а функции платформы моделируются математически вычислительной системой.

Бесплатформенные инерциальные системы разделяются на классы точности, определяемые главным образом точностью используемых гироскопов.

Таблица 2. Классы точности бесплатформенных ИНС

Класс	Дрейф гироскопа (°/h)	Ошибка позиционирования (за 1 час)	Применение в БПЛА
Тактический (Consumer Grade)	10 – 100	1 – 10 км	Гражданские квадрокоптеры
Навигационный (Tactical Grade)	0.1 – 10	0.1 – 1 км	Тактические БПЛА
Стратегический (Navigation Grade)	< 0.01	< 0.1 км	Боевые и спец БПЛА

Для преодоления ограничений наземной и спутниковой навигации активно разрабатываются и внедряются решения на основе воздушных платформ. Их ключевая идея – создание гибкого, адаптивного и оперативно разворачиваемого дополнительного слоя навигационной инфраструктуры в приземном и стратосферном пространстве. Этот слой не заменяет, а эффективно дополняет GNSS и наземные системы, обеспечивая точное и надежное позиционирование там, где традиционные методы недостаточны.

Воздушные платформы, в зависимости от задач и требуемой длительности работы, делятся на несколько типов:

1) беспилотные летательные аппараты (БПЛА): обеспечивают оперативное развертывание навигационной сети. Идеальны для временных сценариев: зоны стихийных бедствий, поисково-спасательные операции. Их ключевое преимущество – высокая мобильность;

2) аэростаты и стратосферные платформы (HAPS – High Altitude Platform Stations): работают на высотах 18 – 25 км, обеспечивая стабильное покрытие на протяжении длительного времени (недели, месяцы). Предназначены для предоставления услуг связи и навигации на огромных территориях.

Роль воздушных платформ в навигации многогранна:

1. ретрансляция и расширение зоны покрытия: платформы могут принимать и ретранслировать сигналы GNSS или наземных станций, «заполняя» мертвые зоны, вызванные рельефом или застройкой;

2. автономные навигационные узлы: платформы могут быть оснащены автономными источниками позиционирования (например, инерциальными системами, опорными маяками) и функционировать как независимые опорные точки для других объектов, обеспечивая навигацию в районах, полностью лишенных инфраструктуры;
3. повышение точности и доступности;
4. улучшение геометрии: расположение выше уровня препятствий обеспечивает лучшие углы прихода сигналов;
5. резервирование: обеспечивают дополнительный источник навигационных данных, повышая отказоустойчивость всей системы;
6. эффективное дополнение к GNSS: в условиях, где спутниковые сигналы недоступны или подавлены, воздушные платформы становятся жизнеспособной альтернативой или мощным дополняющим источником для определения местоположения.

Отдельным и крайне перспективным направлением является создание междроновых навигационных сетей (МДС). В отличие от систем, где воздушная платформа служит стационарной «вышкой» для наземных пользователей, концепция МДС предполагает, что сами БПЛА в группе (рое) образуют динамическую сеть, в которой каждый аппарат является одновременно и потребителем навигационной информации, и ее источником для других.

Принцип работы заключается в обмене между дронами данными о собственном местоположении (GNSS, INS, визуальная одометрия) и телеметрии. Алгоритмы комплексной обработки данных (сенсорного слияния), такие как расширенный фильтр Калмана (EKF), обрабатывают эти данные, вычисляя и уточняя положение каждого дрона относительно группы. Теоретически, при использовании высокоточных относительных измерений (псевдодальности, фазы несущей) между дронами и применении advanced – алгоритмов кооперативной фильтрации, возможно достижение точности, сопоставимой с дифференциальными методами. На сегодняшний день, практическая точность в полностью автономном режиме является предметом активных исследований и оценивается в дециметровом/метровом диапазоне на ограниченных временных интервалах.

Ключевые преимущества МДС:

- кооперативная точность: точность позиционирования всего роя теоретически может превышать точность отдельных его участников за счет статистической обработки данных и взаимных измерений;
- высокая отказоустойчивость: сеть является децентрализованной. Выход из строя одного или нескольких аппаратов не приводит к коллапсу системы, так как оставшиеся дроны продолжают обмениваться данными и перестраивать навигационную сеть;

- масштабируемость: архитектура сети позволяет легко добавлять новые аппараты в группу, которые сразу же начинают участвовать в collective sensing и повышении общей точности навигации.

1) высокая отказоустойчивость: сеть является децентрализованной. Выход из строя одного или нескольких аппаратов не приводит к коллапсу системы, так как оставшиеся дроны продолжают обмениваться данными и перестраивать навигационную сеть;

2) масштабируемость: архитектура сети позволяет легко добавлять новые аппараты в группу, которые сразу же начинают участвовать в collective sensing и повышении общей точности навигации [6].

Сравнительные характеристики навигационных технологий представлены в таблице 3.

Таблица 3. Сравнение технологий позиционирования

Технология	Точность	Преимущества	Недостатки	Применение
Спутниковая (GNSS)	1 – 5 м	Глобальное покрытие, автономность	Уязвимость в «каньонах», лесах, при РЭБ	Базовое позиционирование БПЛА
Дифференциальная (RTK)	1 – 3 см	Сантиметровая точность	Зависит от наземных станций (~40 км)	Картографирование, точное земледелие
Наземная (UWB)	до 10 см	Работа в помещениях/складах	Крайне ограниченная зона покрытия	Навигация складских роботов/БПЛА
5G навигация	5 – 10 м	Использование существующей инфраструктуры	Требует плотного покрытия вышек	Городская логистика
Междроновая сеть	< 5 см (в рое 20+)	Отказоустойчивость, масштабируемость	Требует группового развертывания	Роевые операции в условиях РЭБ

Гибридные навигационные системы представляют собой интегрированное решение, объединяющее спутниковые, наземные и междроновые технологии. Их ключевое преимущество заключается в способности адаптироваться к изменяющимся условиям, обеспечивая непрерывное и точное позиционирование даже в сложных средах. Состав и функции ключевых компонентов такой системы детализированы в таблице 4.

Таблица 4. Компоненты гибридной навигационной системы

Компонент	Функция	Активация	Роль в отказоустойчивости
GNSS приемник	Базовое позиционирование	Всегда, при наличии сигнала	Первичный источник координат

Компонент	Функция	Активация	Роль в отказоустойчивости
RTK – коррекция	Повышение точности до 1 – 3 см	В зоне покрытия наземных станций	Компенсация ошибок атмосферы
Инерциальная система (INS)	Трекинг по курсу/ускорению	При кратковременной потере GNSS	Буферизация сбоев (до 2 – 3 минут)
Междонозная сеть	Обмен данными внутри роя	При выходе за зону RTK/GNSS	Коллективная точность без инфраструктуры
UWB – метки	Точное позиционирование в помещениях	При входе в зону действия меток	Навигация в закрытых пространствах
Алгоритм сенсорного слияния	Динамический выбор источников	Режим реального времени	Автоматическое переключение технологий
Алгоритм комплексной обработки данных	Непрерывная интегрированная оценка вектора состояния (положение, скорость, ориентация) на основе всех доступных источников	Режим реального времени	Оптимальное взвешивание источников, автоматическая адаптация к изменяющимся условиям

Принцип работы гибридной системы основан на непрерывной интегрированной обработке данных от всех доступных источников в едином навигационном фильтре (чаще всего, расширенном фильтре Калмана – EKF). Фильтр строит оптимальную оценку вектора состояния (положение, скорость, ориентация) и их ошибок, динамически адаптируя весовые коэффициенты (ковариации) для каждого из источников в зависимости от их текущей достоверности (например, при ухудшении GNSS – сигнала невязки фильтра увеличиваются, и вес прогноза по ИНС возрастает). На начальном этапе БПЛА использует GNSS. При наличии доступа к RTK – станциям точность повышается. В случае выхода за пределы зоны действия наземных станций или потери спутникового сигнала активируется режим междоножной навигации.

Такая архитектура обеспечивает отказоустойчивость и масштабируемость. Однако важно отметить, что высокая точность для группы БПЛА является целевым показателем и зависит от множества факторов: точности бортовых сенсоров, вычислительных алгоритмов, задержек в сети и геометрии взаимного расположения аппаратов.

Гибридные навигационные системы находят применение в широком спектре задач:

1. мониторинг протяженных объектов: обеспечение непрерывного высокоточного позиционирования БПЛА вдоль ЛЭП, трубопроводов, границ;
2. городская навигация: устойчивость к помехам и затенению GNSS в «каньонах»;

3. логистика: точное позиционирование на открытой местности и внутри складов (с интеграцией UWB);
4. перспективы развития гибридных систем неразрывно связаны с интеграцией новых технологий;
5. квантового сенсора для повышения точности инерциальных навигационных систем (ИНС);
6. искусственный интеллект и машинное обучение.

*Заключение.* Гибридные навигационные системы, объединяющие спутниковые, наземные и междонозные технологии, представляют собой наиболее перспективный путь к обеспечению непрерывного, точного и отказоустойчивого позиционирования БПЛА в сложных условиях. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке эффективных алгоритмов слияния данных, обеспечении безопасности МДС – каналов связи и создании протоколов для массового масштабирования роев.

#### Список используемых источников

1. Сергеев С.Ф. «Беспилотные летательные аппараты: теория и практика» // М.: Издательский дом МАИ, 2021. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.maip.ru/upload/iblock/.../Sergeev\\_BPLA\\_2021.pdf](https://www.maip.ru/upload/iblock/.../Sergeev_BPLA_2021.pdf) (дата обращения: 20.08.2025).
2. Козлов Д.С., Иванов А.А. «Гибридные навигационные системы для мобильных роботов» // Дatalogия, 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://datology-journal.ru/archive/2022/3/5> (дата обращения: 20.08.2025).
3. Каштанов, В. В. Обеспечение связи с использованием беспилотных летательных аппаратов малой дальности / В. В. Каштанов, В. А. Немтинов // Моделирование энергоинформационных процессов, Воронеж, 26–28 декабря 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2023. – С. 22-28. – EDN TZLNWV.
4. Новиков А.С. «Теоретические основы междонозной коммуникации» // Инженерный вестник Дона, 2023. [Электронный ресурс]. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2023/8210> (дата обращения: 20.08.2025).
5. Каштанов, В. В. Анализ возможности повышения устойчивости систем БПЛА, применяемых в составе «роя» при применении их в среде преднамеренных радиопомех / В. В. Каштанов, В. А. Немтинов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы X Международной научно-практической конференции, Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 59-64. – EDN FWNEIQ.
6. Анализ влияния параметров сотовой связи на точность физических измерений в системах интернета вещей / В. В. Каштанов, В. А. Немтинов, М. Э. Самойлов, Д. В. Поддубный // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2025. – Т. 2. – С. 230-232. – EDN JELTRF.

УДК 621(075)

**Фидаров В.Х.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: fidval@mail.ru

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ**

**Fidarov V.H.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: fidval@mail.ru

## **COMPARATIVE TESTS OF TOOL MATERIAL DURABILITY IN TURNING PISTON RINGS**

*Аннотация:* В статье представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на повышение эффективности токарной обработки поршневых колец из высокопрочного чугуна для двигателей ЯМЗ. Проведен сравнительный анализ стойкости режущего инструмента, оснащенного различными марками твердых сплавов (ВК3М, ВК60М, МС321), в условиях существующего технологического процесса на Мичуринском заводе поршневых колец. Установлено, что применение сменных многогранных пластин из сплава МС321 позволяет повысить стойкость инструмента не менее чем в 1,5 раза по сравнению с традиционно используемым сплавом ВК3М. Повышение стойкости инструмента приводит к сокращению вспомогательного времени на подналадку станка и смену инструмента, снижению расхода дорогостоящих инструментальных материалов и повышению стабильности размеров обрабатываемых деталей. Результаты работы имеют практическую ценность и внедрены в производство.

*Ключевые слова:* поршневые кольца, токарная обработка, стойкость инструмента, твердый сплав, высокопрочный чугун, износ, оптимизация.

*Abstract:* The article presents the results of experimental studies aimed at improving the efficiency of turning piston rings made of high-strength cast iron for YaMZ engines. A comparative analysis of the durability of cutting tools equipped with various grades of hard alloys (VK3M, VK60M, MC321) has been carried out in the conditions of the existing technological process at the Michurinsk Piston Ring Plant. It has been established that the use of interchangeable polyhedral plates made of MC321 alloy makes it possible to increase the durability of the tool by at least 1.5 times compared with the traditionally used VK3M alloy. Increasing the durability of the tool leads to a reduction in the auxiliary time for adjusting the machine and changing tools, reducing the consumption of expensive tool materials and increasing the dimensional stability of the machined parts. The results of the work have practical value and have been implemented in production.

*Keywords:* piston rings, turning, tool life, hard alloy, high-strength cast iron, wear, optimization.

### **Введение**

Обработка резанием остается одним из основных технологических процессов в машиностроении, определяющим точность и качество изготовления деталей. В производстве поршневых колец для двигателей внутреннего сгорания к точности обработки предъявляются особо жесткие требования, так как от этого зависят герметичность камеры сгорания, расход масла и общий ресурс двигателя [1]. На Тамбовском заводе подшипников скольжения (ТЗПС) поршневые кольца для Ярославского моторного завода (ЯМЗ) изготавливаются из высокопрочного чугуна, который характеризуется высокой твердостью и абразивными свойствами, что приводит к интенсивному износу режущего инструмента.

Существующий технологический процесс токарной копирной обточки-расточки колец на станке модели МК6026 характеризуется большим расходом инструмента и потерями производительности, связанными с частыми подналадками станка и заменой резцов. Исходной технологией предусматривалось использование твердосплавных пластин марки ВКЗМ, которые напайвались на державку. Однако анализ показал, что данный сплав рекомендован для чистовой обработки, в то время как операция обточки-расточки поршневых колец в пакете является черновой и характеризуется неравномерным припуском, что вызывает ударные нагрузки и повышенный износ [2].

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения стойкости режущего инструмента не менее чем в 1,5 раза для увеличения производительности и снижения себестоимости обработки. Целью данного исследования является сравнительная оценка стойкости различных инструментальных материалов при токарной обработке поршневых колец и выбор наиболее оптимального варианта для внедрения в производство.

### **Методика экспериментальных исследований**

Экспериментальные исследования проводились в Тамбовском государственном техническом университете.

Объектом исследования служила операция 030 – одновременная копирная обточка-расточка верхних компрессионных поршневых колец из высокопрочного чугуна на специальном полуавтомате модели МК6026. Обработка велась в пакетах по 48 колец. Материал заготовок – высокопрочный чугун марки МЗЛ по ГОСТ 846-81 с твердостью 100–108 HRB.

В качестве режущего инструмента использовались токарные резцы со сменными многогранными пластинами (СМП) квадратной формы со стороной 12,7 мм и толщиной 3,18 мм. Исследовались следующие марки твердых сплавов:

- ВКЗМ – применяемый по исходной технологии (контрольный образец).
- ВК60М – альтернативный отечественный сплав для черновой обработки чугуна.

- MC321 – безвольфрамовый твердый сплав совместного производства Sandvik (Швеция) и МКТС (Россия), рекомендуемый для обработки в неблагоприятных условиях.

Геометрические параметры режущей части инструмента оставались неизменными: передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , задний угол  $\alpha = 11^\circ$ , главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ . Режимы резания соответствовали заводским: скорость резания  $V = 43,2$  м/мин ( $n = 100$  мин<sup>-1</sup>), подача  $S = 0,126$  мм/об, глубина резания  $t \approx 0,85$  мм (с учетом колебания припуска на заготовках от 0,8 до 3,7 мм).

Критерием стойкости инструмента служило время работы до достижения предельного износа по задней поверхности  $h_z = 0,6 \dots 0,8$  мм или до появления сколов режущей кромки. Для каждого типа пластин проводилась серия испытаний, после чего определялся средний период стойкости. Дополнительно фиксировалось влияние износа инструмента на точность обработки путем контроля полей рассеяния наружного и внутреннего диаметров обработанных колец.

### Результаты и обсуждение

Проведенные испытания выявили существенные различия в стойкости исследуемых инструментальных материалов. Пластины из сплава **ВКЗМ** показали наименьшую стойкость. Среднее время работы до критического износа составило 45-50 минут, что эквивалентно обработке 5-6 пакетов колец. Износ происходил одновременно по задней и передней поверхностям, в ряде случаев наблюдались выкрашивание и сколы режущей кромки, особенно в условиях неравномерного припуска. Это подтверждает несоответствие данного сплава для черновой обработки высокопрочного чугуна с ударными нагрузками.

Инструмент с пластинами из сплава **ВК60М** показал лучшие результаты. Стойкость возросла в среднем на 30-40% по сравнению с ВКЗМ. Пластины демонстрировали более стабильный износ, меньше подвержены сколам. Это связано с лучшей приспособленностью данного сплава к черновой обработке и прерывистому резанию.

Наивысшую стойкость продемонстрировали пластины из сплава **МС321**. Период их стойкости составил 75-80 минут, что позволило обработать 8-9 пакетов колец без замены инструмента. Таким образом, стойкость увеличилась более чем в 1,5 раза по сравнению с базовым вариантом (ВКЗМ). Пластины МС321 характеризовались равномерным износом по задней поверхности, высокой устойчивостью к абразивному изнашиванию и термическим нагрузкам. Механическое крепление данных пластин, в отличие от напайки, также способствовало повышению надежности и позволяло использовать их многогранность.

Анализ кинетики износа задней поверхности показал, что для сплава МС321 характерна более пологая кривая изнашивания, что свидетельствует о его высокой износостойкости. При этом поля рассеяния наружного и внутреннего диаметров колец, обработанных резцами с пластинами МС321, были на 15-20% уже, чем при использовании инструмента из сплава ВКЗМ. Это связано с более стабильным

характером износа и меньшим влиянием затупления инструмента на упругие деформации технологической системы.

### **Выводы**

1. Проведенные сравнительные испытания подтвердили низкую эффективность применения твердого сплава ВКЗМ для токарной обработки поршневых колец из высокопрочного чугуна в условиях ТЗПС.

2. Установлено, что переход на механическое крепление сменных многогранных пластин из твердого сплава MC321 позволяет повысить стойкость режущего инструмента не менее чем в 1,5 раза по сравнению с базовым вариантом.

3. Повышение стойкости инструмента на основе сплава MC321 обеспечивает сокращение вспомогательного времени, снижение расхода инструмента и повышение стабильности размеров обрабатываемых поршневых колец.

4. Результаты работы имеют высокую практическую ценность и рекомендованы к внедрению на Тамбовском заводе подшипников скольжения для обработки компрессионных поршневых колец двигателя ЯМЗ.

### **Список использованных источников**

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

2. Иноземцев, А.Н. Повышение стойкости режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов / А.Н. Иноземцев, В.П. Сазонов. – М.: Машиностроение, 1985. – 215 с.

3. Грановский, Г.И. Резание материалов: учебник для машиностроительных вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.

4. Русаков, В.И. Способ определения оптимальной скорости резания / В.И. Русаков, А.А. Виноградов // Бюллетень изобретений. – 1976. – №15. – С. 45.

5. Туманов, М.М. Способ определения оптимальной скорости резания / М.М. Туманов // Бюллетень изобретений. – 1983. – №21. – С. 32.

6. Авторское свидетельство SU №848159. Способ крепления сменной многогранной пластины / С.И. Иванов и др. – Оpubл. 1981.

УДК 004.78: 004.89.056.5

**Фурсова А.В.<sup>1</sup>, Яковлев А.В.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: fursova\_arina@inbox.ru

<sup>2</sup>e-mail: yava73@bk.ru

**МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА КАК ОСНОВА АДАПТИВНОЙ ЗАЩИТЫ  
СИТУАЦИОННОГО ЦЕНТРА**

**Fursova A.V.<sup>1</sup>, Yakovlev A.V.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: fursova\_arina@inbox.ru

<sup>2</sup>e-mail: yava73@bk.ru

**MULTI-AGENT SYSTEM AS THE BASIS FOR ADAPTIVE PROTECTION  
OF THE SITUATIONAL CENTER**

*Аннотация.* Рассмотрена архитектура и состав аппаратных и программных средств защиты информации типового ситуационного центра. Предполагается формирование системы защиты ситуационного центра с использованием многоагентного подхода, основанного на принципе непрерывной адаптации каждого средства защиты к изменяющейся среде его функционирования. В этом случае будут функционировать два контура контроля: техническими каналами и сетевыми соединениями. Использование взаимодействия контуров контроля для оперативного выявления попыток несанкционированного доступа позволит создать среду, устойчивую к современным угрозам информационной безопасности, для ситуационного центра.

*Ключевые слова:* ситуационный центр, многоагентная система, информационная безопасность, адаптивная система защиты, интеллектуальный агент.

*Abstract.* The architecture and composition of hardware and software for protecting information in a typical situational center are considered. It is assumed that the situational center's security will be formed using a multi-agent approach based on the principle of the continuous adaptation of each security tool to the changing environment of its functioning. In this case, two control loops will function: technical channels and network connections. Using the interaction of these control loops to quickly identify unauthorized access attempts allows for the creation of an environment for the situation center that is resistant to modern information security threats.

*Keywords:* situational center, multi-agent system, information security, adaptive protection system, intelligent agent.

Ситуационный центр представляет собой сложный инженерно-технический комплекс, в который интегрированы подсистемы аналитики, поддержки принятия решений и мониторинга данных из гетерогенных источников [1]. Его основной задачей является обеспечение актуальной информацией в режиме реального времени лиц, принимающих решения. Архитектура ситуационного центра представляет собой

совокупность следующих компонентов [2, 3]: экраны коллективного пользования, средства видеоконференцсвязи, серверное оборудование, стационарные автоматизированные рабочие места, коммуникационное оборудование, а также специализированное программное обеспечение для моделирования, прогнозирования и визуализации (рис. 1). С одной стороны, такая взаимосвязь компонентов является ключевым преимуществом для пользователей системы, принимающих оперативные решения на основании предоставленных данных. Но с другой стороны, является уязвимостью и целью злоумышленников, стремящихся получить информацию ограниченного доступа.

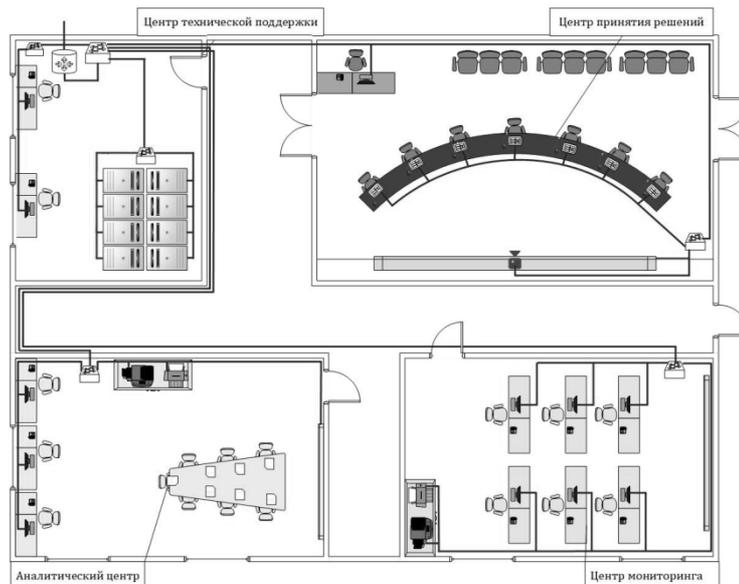


Рис.1. Структура ситуационного центра

Для минимизации угроз информационной безопасности ситуационного центра применяются сертифицированные средства защиты информации в соответствии с требованиями регуляторов информационной безопасности (ФСТЭК России, ФСБ России). Примерами сертифицированного программного обеспечения могут быть Secret Net Studio, Dr. Web Enterprise Security Suite, межсетевой экран и система обнаружения вторжения «Рубикон» и т. д. Набор используемых средств защиты всегда будет основан на необходимости реализации мер защиты информации в следующих аспектах: идентификации и аутентификации субъектов и объектов доступа, управлении доступом субъектов к объектам доступа, регистрации событий безопасности, антивирусной защиты, обнаружения вторжений, защиты средств виртуализации, защиты систем связи и передачи данных.

Атаки злоумышленников на ситуационный центр могут привести не только к получению информации ограниченного доступа, но и к каскадному отказу системы, поскольку успешная реализация атаки на один компонент ситуационного центра спровоцирует цепочку отказов во всей системе. Применяемые средства защиты информации, основанные на заранее заданных правилах, не способны противостоять современным быстроменяющимся угрозам. Для противодействия таким видам атак злоумышленников необходима система информационной защиты ситуационного

центра, обладающая следующими свойствами: адаптивность, способность к самообучению, распределенность.

Предполагается формирование архитектуры системы защиты ситуационного центра, основанного на принципе непрерывной адаптации каждого средства защиты к изменяющейся среде его функционирования. Многоагентные системы (МАС) позволяют в полной мере реализовать заданную концепцию.

Многоагентные системы – это системы, состоящие из множества взаимодействующих интеллектуальных агентов [4]. Сами агенты представляют собой сущности, включающие в себя программные и/или аппаратные компоненты, которые находятся в некоторой среде и получают данные из нее, интерпретируют их и ответно воздействуют на среду [4]. Агенты обладают следующими свойствами [5]: автономность, общественное поведение, реактивность, проактивность.

Данные свойства интеллектуальных агентов создают основу для построения децентрализованной системы защиты, устойчивой к каскадным отказам. Автономность агентов проявляется в их способности анализировать поведенческие паттерны и самостоятельно корректировать параметры средств защиты даже при потере связи с центральным узлом управления. Общественное поведение (социальность) агентов позволяет обеспечивать синхронизацию настроек разных типов средств защиты для формирования более сложных сценариев защиты информации, циркулирующей в ситуационном центре. Реактивность системы выражается в немедленной адаптации защитных механизмов при выявлении аномальной активности, в то время как проактивные возможности позволяют многоагентной системе заблаговременно модифицировать, например, конфигурацию резервного копирования на основе прогнозирования потенциальных атак.

В ситуационном центре помимо средств защиты от утечки информации ограниченного доступа применяются также средства защиты информации от утечки по техническим каналам, таким как акустический, акустовибрационный, акустоэлектрический, побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) и др. Поэтому необходимо рассмотреть построение защиты на основе многоагентной системы, состоящей из двух контуров:

- контура контроля технических каналов;
- контура контроля сетевых соединений.

Контур контроля технических каналов формируется из агентов, встроенных в средства защиты такие как, например, комплекс виброакустической защиты «Соната АВ-4Б» и система для защиты от утечки информации каналам ПЭМИН «Гром-ЗИ-4Б». Агент генератора шума системы «Гром-ЗИ-4Б» может контролировать свое текущее состояние и динамически изменять мощность и диапазон помех на основе данных, полученных из среды. Аналогична работа агента виброакустической защиты, которая управляет системой «Соната АВ-4Б»: активируются маскирующие вибрации при возникновении акустической активности, а также изменение мощности воспроизводимых формируемых помех в зависимости от получаемых данных из среды.

Контур контроля сетевых соединений также формируется из агентов, встроенных в готовые сертифицированные программно-аппаратные средства защиты от несанкционированного доступа. Примерами могут выступать агенты мониторинга серверов, которые отслеживают состояния серверов и целостность хранимых данных, и агенты антивирусной защиты, непрерывно следящие за активностью в установленной среде, изменяющие программные настройки на основе анализа и т. д.

Преимущество многоагентного подхода в данной ситуации – возможность синергии между этими двумя контурами для оперативного выявления каких-либо изменений в одном из контуров, если другой передает сообщение о зафиксированной попытке несанкционированного доступа. Для такого взаимодействия возможно применение как традиционных протоколов взаимодействия агентов в системе, такие как FIPA ACL и KQML, введенных в 1990-х годах, так и современных, отвечающие требованиям современных многоагентных систем (A2A, CibberLink Mode).

Таким образом, рассмотренный подход в применении многоагентной системы в ситуационном центре позволяет трансформировать статичные средства защиты в адаптивную систему, в которой непрерывно будет происходить переконфигурирование параметров средств защиты, что повышает безопасность инфраструктуры к современным сложноорганизованным угрозам.

#### Список использованных источников

1. ГОСТ Р 56875-2016. Информационные технологии. Системы безопасности комплексные и интегрированные. Типовые требования к архитектуре и технологиям интеллектуальных систем мониторинга для обеспечения безопасности предприятия и территорий: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2017-010-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 46 с.

2. Фурсова А. В. Анализ актуальных угроз ситуационного центра регионального уровня / А. В. Фурсова, А. В. Яковлев // Актуальные проблемы кибербезопасности. Противодействие экстремизму и терроризму в информационной молодежной среде : Сборник докладов I межрегиональной научно-практической конференции, Брянск, 29 апреля 2025 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2025. – С. 220-224.

3. Симанков В. С. Программное и аппаратное обеспечение подсистем интеллектуального ситуационного центра / В. С. Симанков, В. А. Шарай // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2021. – №3 (286). – С. 63–72.

4. FIPA (The Foundation for Intelligent Physical Agents) – URL: <https://www.chiariglione.org/standards/fipa> (дата обращения: 01.11.2025)

5. Многоагентные системы (обзор) // Сайт С.П. Курдюмова – URL: <https://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor> (дата обращения: 01.11.2025).

УДК 62-231.1

**Майоров Н. И.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: del00x@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ  
МАНИПУЛЯТОРОВ**

**Mayorov N. I.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: del00x@mail.ru

**MODELING OF SPATIAL MANIPULATORS KINEMATICS**

*Аннотация.* В данной статье описан метод моделирования кинематики пространственных манипуляторов. Группы Ли могут быть использованы для описания обобщенного движения твердых тел в трехмерном евклидовом пространстве, алгебры Ли являются бесконечно малыми генераторами таких движений. В статье представлена формула произведения экспонент, описывающая кинематику последовательного пространственного манипулятора. Она показывает зависимость конфигурации конечного звена манипулятора от углов поворота вращательных кинематических пар.

*Ключевые слова:* алгебры Ли, группы Ли, кинематика, манипуляторы, формула произведения экспонент

*Abstract.* This article describes a method for modeling the kinematics of spatial manipulators. Lie groups can be used to describe generalized motion of rigid bodies in three-dimensional Euclidean space, Lie algebras are infinitesimal generators of such motions. The article presents the product of exponential formula describing the kinematics of a serial spatial manipulator. That shows the dependence of the configuration of the end-effector of the manipulator on the rotation angles of joints.

*Keywords:* Lie algebras, Lie groups, kinematics, manipulators.

Математические модели кинематики, основанные на группах Ли, позволяют получать более компактные выражения по сравнению с классическими методами за счет того, что угловая и линейная составляющие движения рассматриваются совместно [1].

Группа движений твердого тела в трехмерном евклидовом пространстве  $\mathbb{R}^3$  представлена отображением  $g: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$  имеющим форму  $g(x) = Rx + p$ , где  $R \in SO(3)$  — это матрица поворота (элемент специальной ортогональной группы), а  $p \in \mathbb{R}^3$  — вектор смещения. Элемент специальной евклидовой группы  $g \in SE(3)$  можно записать в виде матрицы 4x4 [2]:

$$g = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)} \quad (1)$$

Алгебра Ли  $\xi \in se(3)$  есть касательный вектор к единичному элементу группы  $SE(3)$ . Поворот вращательной кинематической пары можно описать как обобщенное винтовое движение с нулевым шагом, алгебра Ли, являющаяся генератором такого движения, имеет следующую форму:

$$\hat{\xi} = \begin{bmatrix} \hat{\omega} & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}; \xi = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}_{(6 \times 1)}, \quad (2)$$

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}; \omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$v = -\omega \times q, \quad (4)$$

где  $\omega$  – нормализованный вектор оси вращения,

$q$  – точка на оси вращения.

Умножив алгебру Ли на параметр угла поворота и взяв экспоненту, получим однопараметрическую подгруппу  $SE(3)$ , описывающую вращение твердого тела вокруг оси, заданной этой алгеброй Ли:

$$g = e^{\hat{\xi}\theta}, \quad (5)$$

где  $\theta$  – угол поворота звена.

Прямая кинематика последовательного пространственного манипулятора может быть описана с помощью формулы произведения экспонент [1]:

$$g(\theta) = e^{\hat{\xi}_1\theta_1} e^{\hat{\xi}_2\theta_2} \dots e^{\hat{\xi}_n\theta_n} g_0, \quad (6)$$

$$e^{\hat{\xi}\theta} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}\theta} & (I - e^{\hat{\omega}\theta})(\omega \times v) + \omega\omega^T v\theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)} \quad (7)$$

Матричная экспонента в данном случае может быть найдена по формуле Родрига:

$$e^{\hat{\omega}\theta} = I + \hat{\omega} \sin \theta + \hat{\omega}^2 (1 - \cos \theta) \quad (8)$$

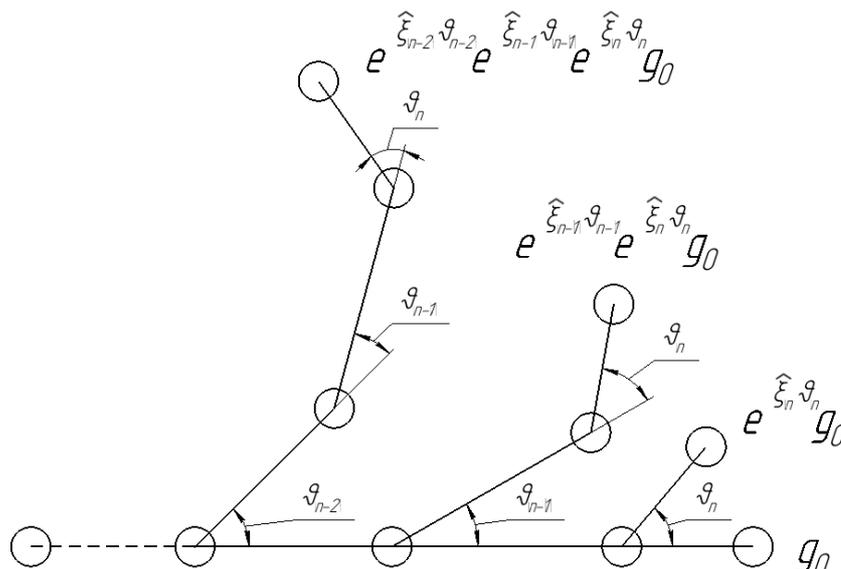


Рис. 1. Формула произведения экспонент

Пространственная обобщенная скорость  $V^s$  — это комбинация линейной  $v^s$  и угловой  $\omega^s$  скорости точек твердого тела, выраженная в системе координат, связанной с неподвижной стойкой. Она также описывается элементом алгебры Ли  $se(3)$ .

$$V^s = J^s(\theta)\dot{\theta}, \quad (9)$$

$$\widehat{V}^s = \begin{bmatrix} \widehat{\omega} & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}; V^s = \begin{bmatrix} v^s \\ \omega^s \end{bmatrix}_{(6 \times 1)}, \quad (10)$$

$$V^s \in se(3), \quad (11)$$

где  $J^s$  – пространственный якобиан манипулятора.

Она может быть использована для вычисления вектора мгновенной скорости любой точки на твердом теле, если мы знаем ее координаты  $q$ :

$$\dot{q}^s = \widehat{V}^s q^s \quad (12)$$

Пространственный якобиан манипулятора представляет собой отображение из угловых скоростей вращательных пар в обобщенные скорости конечного звена. Столбцы матрицы Якобиана состоят из элементов алгебры Ли, учитывающих присоединенное действие группы Ли. Другими словами, рассматривается текущая конфигурация звеньев манипулятора, а не исходная [3].

$$J^s(\theta) = [\xi_1 \quad \xi'_2 \quad \dots \quad \xi'_n]_{(6 \times n)}, \quad (13)$$

$$\xi'_i = Ad_{(e^{\widehat{\xi}_1 \theta_1} e^{\widehat{\xi}_2 \theta_2} \dots e^{\widehat{\xi}_{i-1} \theta_{i-1}})} \xi_i, \quad (14)$$

Присоединенное действие группы Ли представлено следующим образом:

$$Ad_g = \begin{bmatrix} R & \widehat{p}R \\ 0 & R \end{bmatrix}_{(6 \times 6)}, \quad (15)$$

$$g_j = e^{\widehat{\xi}_1 \theta_1} \dots e^{\widehat{\xi}_{j-1} \theta_{j-1}} = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)} \quad (16)$$

Таким образом, в данной статье было продемонстрировано, как применение групп Ли и алгебр Ли для моделирования кинематики пространственных последовательных манипуляторов обеспечивает единое и компактное описание вращений и трансляций твердого тела в трехмерном пространстве. Формула произведения экспонент объединяет как вращательную, так и поступательную составляющие движения, упрощая представление кинематики манипулятора, что может быть особенно полезным для сложных многозвенных пространственных систем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка иммерсивной системы взаимодействия с виртуальной реальностью для профессиональной подготовки на основе всенаправленной платформы» (124102100628-3).*

#### Список использованных источников

1. Brockett, R. W. Robotic manipulators and the product of exponentials formula. / R. W. Brockett // Springer, 2005, Vol. 58, P. 120-129.
2. Murray, R. M. Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. / R.M. Murray, Z. Li, S.S. Sastry // Boca Raton, Florida, CRC Press, 1994. P. 35-42.
3. Sun, P. Generalized Kinematics Analysis of Hybrid Mechanisms Based on Screw Theory and Lie Groups Lie Algebras. / P. Sun, Y. Li, K. Chen // Chin. J. Mech. Eng. Vol. 34. 2021. P. 3.

УДК 62-231.1

**Майоров Н. И., Обухов А.Д.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: del00x@mail.ru

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРЯМОЙ КИНЕМАТИКИ РЕАБИЛИТАЦИОННОГО МАНИПУЛЯТОРА ВЕРХНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ**

**Mayorov N. I., Obukhov A.D.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: del00x@mail.ru

## **DESIGNING OF A MODEL OF UPPER LIMB REHABILITATION MANIPULATOR FORWARD KINEMATICS**

*Аннотация.* В данной статье представлена модель прямой кинематики реабилитационного манипулятора верхних конечностей. Вращательные кинематические пары описываются с помощью алгебр Ли, или кинематических винтов. С помощью формулы произведений экспонент выведены уравнения зависимости ориентации конечного звена, и его положения в пространстве от угловых координат.

*Ключевые слова:* алгебры Ли, группы Ли, кинематика, манипуляторы, ортез, реабилитация, формула произведения экспонент, экзоскелет

*Abstract.* This article presents a model of the forward kinematics of the upper limb rehabilitation manipulator. Rotational joints are described using Lie algebras, or twists. Equations expressing the dependence of the end effector's orientation and spatial position on angular coordinates have been derived using the exponential product formula.

*Keywords:* Lie algebras, Lie groups, kinematics, manipulators, orthosis, product of exponentials formula, exoskeleton

Разрабатываемое устройство представляет собой роботизированный реабилитационный комплекс экзоскелетного типа, предназначенный для реабилитации двигательной активности верхних конечностей. Задача устройства заключается в том, чтобы генерировать необходимые усилия и прикладывать их к руке человека, помогая ему выполнять упражнения, заключающиеся в движении рукой по заданной траектории. Усилия, оказываемые устройством на руку пациента, рассчитываются на основе данных об отклонении конфигурации руки от требуемой в данный момент времени.

Реабилитационный комплекс имеет 4 степени свободы, в качестве приводов было принято решение использовать пневмоцилиндры, так как они имеют высокую удельную мощность и компактные размеры.

Математические модели кинематики и динамики устройства основаны на описании движений твердого тела с помощью групп и алгебр Ли, что позволяет получить более компактные выражения по сравнению с классическими методами за счет того, что угловые и линейные компоненты движения рассматриваются вместе [1]. Для описания прямой кинематической зависимости между углами поворота звеньев и конфигурацией выходного звена используется формула произведений экспонент [2].

Конфигурация выходного звена манипулятора относительно неподвижной системы координат, связанной со стойкой, выражается как:

$$g_{out} = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} \dots e^{\hat{\xi}_n \theta_n} g_{out0}, \quad (1)$$

$$e^{\hat{\xi} \theta} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega} \theta} & (I - e^{\hat{\omega} \theta})(\omega \times v) + \omega \omega^T v \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}, \quad (2)$$

$$e^{\hat{\omega} \theta} = I + \hat{\omega} \sin \theta + \hat{\omega}^2 (1 - \cos \theta), \quad (3)$$

$$\hat{\xi} = \begin{bmatrix} \hat{\omega} & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}; \quad \xi = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}_{(6 \times 1)}, \quad (4)$$

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$v = -\omega \times q, \quad (6)$$

где:  $\theta$  – угол поворота вращательной пары,  
 $\omega$  – нормированный вектор оси поворота,  
 $q$  – точка на оси поворота,  
 $g_{out}$  – текущая конфигурация выходного звена,  
 $g_{out0}$  – исходная конфигурация выходного звена,  
 $\xi$  – кинематический винт.

Координаты центров вращательных пар (мм):

$$q_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; q_2 = \begin{bmatrix} -120 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; q_3 = \begin{bmatrix} -120 \\ 41 \\ -h \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$q_4 = \begin{bmatrix} -120 \\ l + 41 \\ -h \end{bmatrix}; q_5 = \begin{bmatrix} 30 \\ l + 41 + 100 \\ -h - 110 \end{bmatrix}; q_{5b} = \begin{bmatrix} 30 \\ l + 41 + 50 \\ -h - 110 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где:  $l = 315$  мм – длина плеча,  
 $h = 151$  мм - вертикальное смещение плеча.

Направления осей вращательных пар:

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \omega_3 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\omega_4 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \omega_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \omega_{5b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Кинематические винты  $\xi_{1-5}$ , описывающие вращательные пары манипулятора, имеют следующие координаты (см. рисунок 1):

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \xi_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 120 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \xi_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 151 \\ 41 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \xi_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 151 \\ 356 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \xi_5 = \begin{bmatrix} 456 \\ -30 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \xi_{5b} = \begin{bmatrix} 406 \\ -30 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

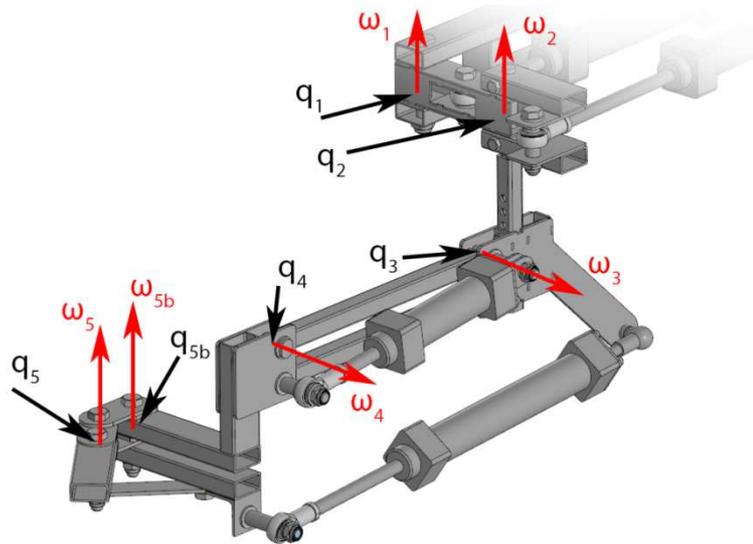


Рис. 1. Компоненты кинематических винтов вращательных пар

Исходная конфигурация конечного звена манипулятора:

$$g_{out0} = \begin{bmatrix} R_{out0} & p_{out0} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}, \quad (12)$$

$$R_{out0} = I, \quad (13)$$

$$p_{out0} = \begin{bmatrix} -71,742383 \\ 579,484766 \\ -261 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где:  $R_{out0}$  – матрица поворота выходного звена,

$p_{out0}$  – координаты положения точки выходного звена в глобальной системе координат.

Уравнения зависимости ориентации конечного звена от угловых координат для манипулятора верхних конечностей (принимая во внимание, что  $\theta_4 = -\theta_3$ ):

$$g_{out} = \begin{bmatrix} R_{out} & p_{out} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)}, \quad (15)$$

$$R_{out} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_5) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_5) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_5) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$p_{out} = \begin{bmatrix} p_{outx} \\ p_{outy} \\ p_{outz} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 p_{outx} = & 205,866462 \cos(\theta_1 + \theta_2 + 0,754480) - 120 \cos(\theta_1) \\
 & - 157,5 \sin(\theta_1 + \theta_2 - \theta_3) - 157,5 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (18) \\
 & - 159,907629 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_5 + 0,689293),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{outy} = & 205,866462 \sin(\theta_1 + \theta_2 + 0,754480) - 120 \sin(\theta_1) \\
 & + 157,5 \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_3) + 157,5 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (19) \\
 & + 159,907629 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_5 + 0,689293),
 \end{aligned}$$

$$p_{outz} = - 315 \sin(\theta_3) - 261 \quad (20)$$

На рисунке 2 представлен прототип реабилитационного манипулятора верхних конечностей.



Рис. 2. Прототип манипулятора верхних конечностей

Таким образом, в рамках данного исследования была построена прямая кинематическая модель манипулятора. Применение формулы произведений экспонент позволило получить аналитические выражения для вычисления положения и ориентации конечного звена. Разработанная модель является фундаментом для решения дальнейших задач, таких как планирование траекторий и управление движением реабилитационного робота.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка иммерсивной системы взаимодействия с виртуальной реальностью для профессиональной подготовки на основе всенаправленной платформы» (124102100628-3).*

#### Список использованных источников

1. Brockett, R. W. Robotic manipulators and the product of exponentials formula. / R. W. Brockett // Springer, 2005, Vol. 58, P. 120-129.
2. Murray, R. M. Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. / R.M. Murray, Z. Li, S.S. Sastry // Boca Raton, Florida, CRC Press, 1994. P. 35-42.

УДК 621.91.01

**Капустин С.С., Немтинов В.А., Торбин Д.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: d9051231073@gmail.com

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕИНЖИНИРИНГА ПРИ РАЗРАБОТКЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА  
ВАЛА КОРОМЫСЕЛ CAT C-15**

**Kapustin S.S., Nemtinov V.A., Torbin D.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: d9051231073@gmail.com

**USE OF REENGINEERING IN THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL  
PROCESSES AND THE ORGANIZATION OF THE PRODUCTION OF THE  
CAT C-15 ROCKER ARM SHAFT**

*Аннотация.* Основная проблема изготовления отдельного узкоспециального изделия в условиях отсутствия технической документации заключается в отсутствии детальных данных. В работе рассмотрены вопросы решения задачи по выпуску отдельного изделия с использованием технологии обратного инжиниринга или обратного проектирования.

*Ключевые слова:* обратный инжиниринг, проектирование, технологический процесс, организация производства, вал коромысла.

*Abstract.* The main problem of manufacturing a separate highly specialized product in the absence of technical documentation is the lack of detailed data. The paper considers the issues of solving the problem of producing a separate product using reverse engineering or reverse engineering technology.

*Keywords:* reverse engineering, design, technological process, production organization, rocker shaft.

В работе рассмотрены вопросы решения задачи по выпуску отдельного изделия с использованием технологии обратного инжиниринга или обратного проектирования [1]. Реинжиниринг — это процесс изучения готовой конструкции, устройства или программного продукта с целью понимания принципов его работы, воспроизведения аналогичных характеристик или внесения модификаций. Другими словами, это исследование готового изделия с целью воссоздания исходных проектных документов, чертежей, схем или алгоритмов, которые были использованы при его создании. Изучение способов его изготовления.

Цели обратного инжиниринга заключается в следующем:

- 1) Воспроизведение оригинала без наличия документации;

- 2) Улучшение технических характеристик изделия путём модификации;
- 3) Изучение патентованных конструкций для дальнейшего проектирования собственных аналогов;
- 4) Оценка инновационных решений конкурирующих производителей.

Так же реинжиниринг открывает большие перспективы совершенствования процессов проектирования, производства и тестирования деталей. Благодаря этому методу мы сможем самостоятельно создать всю необходимую техническую документацию, определить слабые места имевшегося изделия и в перспективе доработать его, а также создать на его основе цифровой двойник в системах CAD/CAM.

Стоит отметить, что в условиях жесткой конкуренции или внешнего давления реинжиниринг позволяет скопировать и воссоздать технологии конкурентов с дальнейшим их использованием. [2, 3].

В работе технология реинжиниринга использована для изделия «вал коромысел САТ С-15.» (см. рис. 1).



Рис. 1. Фото детали «вал коромысел САТ С-15»

Запуск производства и организация серийного производства включает следующие этапы:

- 1) Дефектация (разборка): сначала деталь внимательно осматривается специалистами. Изучаются повреждения, коррозия, износ поверхности, трещины и другие дефекты. Для детального осмотра могут использоваться микроскопы и рентгенография;

- 2) Замеры и анализ материалов: используя лазерные сканеры, координатно-измерительное оборудование, производится точное измерение геометрических размеров и формы изношенной детали. Также проводятся испытания материала на прочность, твердость, химический состав и свойства;

- 3) Создание трехмерной модели: полученные измерения и их анализ используются при создании модели в САД-программах (Компас, AutoCAD). Создается виртуальная трехмерная модель вала, точно повторяющая оригинальную конструкцию, с внесением поправок при обнаружении недостатков (см. рис. 2);

- 4) Проектирование тестового варианта: на основании проведенного анализа инженеры создают конечную цифровую копию и на ее основе создают технологический процесс производства, указывая материал, и необходимые операции (точение, фрезеровка). Он включает в себя:

- предварительная механообработка (напил заготовок необходимой длины; токарная обработка в черновой проход; фрезерование и сверление отверстий и скосов);

- окончательная механообработка (токарная обработка в чистовой проход; нарезание резьбы);

- слесарная операция (доводка изделия, притупление кромок);

- контроль (проверка изделия по чертежу);

5) Создание и испытание прототипа: прототип изготавливается традиционными методами механической обработки (точение, фрезеровка). Затем новая версия подвергается испытанию на стендах или реальных машинах, чтобы проверить её надежность и долговечность;

6) Серийный выпуск: Если тестирование показывает положительный результат, данная версия детали запускается в серийное производство. Если же результаты тестирования были неудовлетворительны, весь цикл повторяется с упором на уже полученные данные.



Рис. 2. деталь «вал коромысел CAT C-15 в системе NX»

Таким образом, обратный инжиниринг позволяет создать отсутствующее или малодоступное на рынке изделие, для собственных нужд или же его сбыта. Так же реинжиниринг является мощным и перспективным инструментом, используемым компаниями для быстрого овладения новыми технологиями и повышения общей эффективности производственных процессов. Его популярность обусловлена гибкостью и универсальностью метода, возможностью применять современные цифровые технологии и минимальные временные затраты на реализацию проектов.

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-82.

2. Минин, А. А. Применение алгоритма муравьиных колоний для создания технологических процессов обработки резанием / А. А. Минин, В. А. Немтинов // Инженерные технологии. – 2023. – № 3(3). – С. 31-36. – EDN LAMZQA.

3. Реинжиниринг отсканированной детали в среде Solid Edge. Электронный ресурс: [https://www.youtube.com/watch?v=D\\_zpHVZNCKY](https://www.youtube.com/watch?v=D_zpHVZNCKY) Дата обращения: 20.10.2025.

УДК 004.942

**Вехтева Н. А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: magician.loner@yandex.ru

**АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА ТРЕХМЕРНОГО ЦИФРОВОГО ЧЕРТЕЖА И  
ОПТИМИЗАЦИИ FDM-ПЕЧАТИ ЗА СЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ**

**Vehteva N.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: magician.loner@yandex.ru

**ALGORITHMS FOR ANALYZING 3D DIGITAL MODELS AND OPTIMIZING  
FDM PRINTING THROUGH SPATIAL ORIENTATION TRANSFORMATION**

*Аннотация.* В данной статье рассмотрены основные этапы производства изделий по технологии FDM, предложены метод и алгоритмы обработки трехмерного цифрового чертежа и оптимизации печати за счет изменения пространственной ориентации в зависимости от требований к качеству, времени и объему используемого материала. Для ускорения расчётов предложен двухэтапный алгоритм с поддержкой параллельных вычислений.

*Ключевые слова:* аддитивное производство, параллельные вычисления, точность печати, трёхмерное моделирование, FDM, оптимизация ориентации.

*Abstract.* This article examines the key stages of FDM manufacturing, proposes a method and algorithms for processing 3D digital drawings and optimizing printing by varying spatial orientation depending on quality, time, and material volume requirements. To speed up calculations, a two-stage algorithm with parallel computing support is proposed.

*Keywords:* additive manufacturing, parallel computing, print accuracy, 3D modeling, FDM, orientation optimization.

*Введение.*

Трёхмерная печать на сегодняшний день широко используется в различных сферах промышленности и мелкосерийного производства изделий. Одной из популярных технологий печати является FDM (моделирование послойным наплавлением) из-за простоты в эксплуатации и меньшей стоимости производства [1]. Для начала процесса печати необходим трехмерный цифровой чертеж (ТЦЧ) изделия, который создается с помощью специализированных САД или с помощью трехмерного сканирования реального объекта. После создания ТЦЧ зачастую экспортируется в файл формата STL

(Standard Tessellation Language). STL формат описывает трехмерные поверхности объекта, используя сетку взаимосвязанных треугольников (грань, полигонов), заданных координатами вершин и вектором нормали [2]. Затем файл импортируется в слайсеры – компьютерная программа, которая преобразует виртуальную 3D-модель объекта в машинный код (G-код) для управления печатью, в частности, 3D-принтером [3].

После получения данных ТЦЧ и исправления ошибок STL формата (из-за отсутствия данных о смежности треугольников, геометрическое описание ТЦЧ может быть считано некорректно), в программе-слайсере задают параметры для печати такие, как выбор пространственной ориентации, положения и масштаба изделия; установка значений настроек для устройства печати и материала [4] и другие. Этап подготовки ТЦЧ, в том числе настройка угла наклона к платформе построения, может значительно повлиять на результирующее качество готового изделия, время его печати и на количество затрачиваемого материала [5].

#### *Оптимизация ТЦЧ.*

В предыдущих исследованиях [6] были выявлены основные проблемы и представлены математические модели для описания взаимосвязи пространственной ориентации с качеством и временем печати, а также с количеством затрачиваемого материала при аддитивном производстве изделия методом лазерного спекания. На текущий момент областью исследования стала аддитивная печать методом послойного наплавления, но цель и задачи остались прежними: снизить время и количество материала, повысить качество за счет оптимизации пространственной ориентации ТЦЧ. Так как большинство популярных слайсеров имеют функцию автоматической ориентации без указания конкретных настроек под необходимые требования, то разработка методов и алгоритмов для более тонкой настройки печати является актуальной.

Разрабатываемый в рамках исследования метод учитывает конкретные элементы изделия, например, цилиндрические поверхности, для уточнения вычислений оптимальной ориентации в отличии от стандартных функций слайсеров. Ниже представлена разработанная на текущий момент математическая модель взаимосвязи пространственной ориентации и выбранных критериев.

Вместо понятия «качество печати» принимается «точность печати»  $K(\vec{R})$ , которая определяется по следующим критериям:

–  $K_1(\vec{R})$  – сумма отклонений формы готового изделия от исходных размеров, заданных в ТЦЧ (получение из экспериментальных данных о печати изделий конкретной формы и использования методов интерполяции);

–  $K_2(\vec{R})$  – сумма искажений размеров готового изделия (получение аналогично  $K_1(\vec{R})$ );

–  $K_3(\vec{R})$  – средняя длина образованных отступов слоев на поверхности изделия (геометрический расчет);

–  $K_4(\vec{R})$  – суммарная площадь образования излишек материала и отступов слоев на поверхности изделия (геометрический расчет).

Параметр  $\vec{R}\{Rx, Ry, Rz\}$  – вектор угла наклона, трехмерного цифрового чертежа в области печати относительно платформы построения в координатной плоскости платформы,  $Rx, Ry, Rz$  – углы наклона по осям  $Ox, Oy, Oz$  соответственно. Подробно формулы для расчета критериев точности в данной статье рассматриваться не будут.

Формула для нахождения точности печати  $K(\vec{R})$ , объединяющая в себе все критерии следующая:

$$K(\vec{R}) = 1 - (\alpha \bar{K}_1 + \beta * \bar{K}_2 + \gamma * \bar{K}_3 + \delta * \bar{K}_4), \bar{K}_i = K_i \text{norm}(Rx, Ry, Rz),$$

где  $i = 1...4$  – номер критерия точности  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  – коэффициенты важности данного класса, такие что  $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$ .

В связи с тем, что при расчетах пространственной ориентации изменяются только значения  $\vec{R}$  при константных остальных параметрах печати и основная задача состоит в определении диапазона значений от минимального к максимальному, для расчета времени печати  $T(\vec{R})$  используется упрощенная математическая формула:

$$T(\vec{R}) = \sum_{i=0}^{N_{\text{layer}}} (S_{\text{plots}_i} * T_{\text{layer}}) + N_{\text{layer}} * T_{\text{ch}},$$

где:

- $S_{\text{plots}}\{S_{\text{plot}}\}$  – множество значений площадей сечений ТЦЧ;
- $N_{\text{layer}} = \frac{H(\vec{R})}{h_{\text{layer}}}$  – количество сечений ТЦЧ,  $H(\vec{R})$  – высота модели по оси  $Oz$ ,  $h_{\text{layer}}$  – толщина слоя;
- $T_{\text{layer}}$  – время печати единицы площади (константа);
- $T_{\text{ch}}$  – время, необходимое для перехода печати на новый слой (константа).

Для вычисления объема материала  $V(\vec{R})$ , необходимого для печати, математическая формула также упрощена. Принято допущение о том, что изделие печатается с заполнением в 100% формы, изменение объема происходит только за счет изменения объема поддерживающих конструкций (поддержек) для нависающих элементов (есть предельный угол наклона поверхности, при котором последующие слои не могут быть построены печатающим устройством; начало элемента изделия находится не на первом слое печати – в «воздухе»). Для поддержек также принято допущение о 100% заполнении, расчет происходит по формуле нахождения объема усеченной призмы. Формула для расчета  $V(\vec{R})$  выглядит следующим образом:

$$V(\vec{R}) = \sum_{i=0}^N \begin{cases} S_{F_i}^* * \frac{z_{A_i} + z_{B_i} + z_{C_i}}{3}, & \text{если } (90 + \omega) \leq \angle(\vec{n}_{\text{norm}_i}, \vec{OZ}) \leq 180 \\ 0, & \text{если } (90 + \omega) \geq \angle(\vec{n}_{\text{norm}_i}, \vec{OZ}) \text{ и } \angle(\vec{n}_{\text{norm}_i}, \vec{OZ}) \geq 180 \end{cases},$$

где  $S_{R_i}^* = x_{A_i}(y_{B_i} - y_{C_i}) + x_{B_i}(y_{C_i} - y_{A_i}) + x_{C_i}(y_{A_i} - y_{B_i})$  – площадь проекции  $i$  грани на плоскость XOY [7],  $x, y, z$  – координаты вершины ТЦЧ;  $\vec{n}_{norm}$  – вектор нормали к грани.

Для объединения всех характеристик в одно значения используется метод взвешенной суммы. Целевая функция  $F(\vec{R})$ :

$$F(\vec{R}) = w_T \cdot \bar{T}(\vec{R}) + w_V \cdot \bar{V}(\vec{R}) - w_K \cdot \bar{K}(\vec{R}),$$

где  $w_T, w_V, w_K$  – коэффициенты важности критериев  $\bar{T}(\vec{R}), \bar{V}(\vec{R}), \bar{K}(\vec{R})$  такие, что:

$$w_T + w_V + w_K = 1, w_T, w_V, w_K \geq 0.$$

Задача оптимизации:

$$F(\vec{R}) \rightarrow \min.$$

Решение задачи осуществляется с помощью построения множества Парето и выбора решения за счет указанных коэффициентов важности критериев.

*Параллельная обработка.*

С учетом того, что детализация ТЦЧ не постоянна и файл STL может содержать как десять (пирамида), так и миллионы треугольников, вычисления по предложенной математической модели может быть нерационально велики для прохода по всем возможным  $R_x, R_y, R_z$  даже при работе с целочисленными значениями. Поэтому в рамках исследования разработан двухэтапный алгоритм поиска оптимальной пространственной ориентации ТЦЧ (рис.1):

1. получение данных ТЦЧ, входных параметров (коэффициенты, константы и тд.);
2. анализ и оптимизация геометрии ТЦЧ;
3. грубый перебор углов наклона ТЦЧ с шагом  $\delta$ .
4. локальное уточнение с шагом  $1^\circ$  в окрестностях  $\pm 14^\circ$  от двух лучших кандидатов.
5. Получение глобального минимума  $F(\vec{R})$  вывод значений  $\vec{R}$ , поворот ТЦЧ на эти значения.

Оптимизация геометрии необходима для снижения вычислительной сложности, применяется агрегация смежных треугольников с коллинеарными нормальными в плоские N-гоны (полигон из N вершин):

- построение графа смежности треугольников;
- группирование треугольников по критерию:  $\angle (\vec{n}_{norm}^i; \vec{n}_{norm}^j) \leq 1$ ;
- для каждой группы:
  - объединение вершин в единый многоугольник
  - вычисление общей площади N-гона и его нормали

Этот этап сокращает количество обрабатываемых элементов без потери геометрической точности.

Алгоритм поиска оптимальной пространственной ориентации после задания всех коэффициентов начинается с метода грубого перебора (глобальный

поиск). Формируется сетка углов с конкретным шагом, например,  $15^\circ$ ,  $\theta \{0^\circ, 15^\circ, \dots, 90^\circ\}$ . Затем для каждого угла  $\theta_i$  параллельно вычисляются:

- поворот ТЦЧ на указанный угол;
- критерии  $K_1(\theta_i), K_2(\theta_i), K_3(\theta_i), K_4(\theta_i)$ ,
- критерии  $T(\theta_i), K(\theta_i), V(\theta_i)$ ;
- значение целевой функции  $F(\theta_i)$ .

По окончании вычислений, выбираются два угла  $\theta_1^*$  и  $\theta_2^*$  с минимальными значениями  $F(\theta_i)$ .

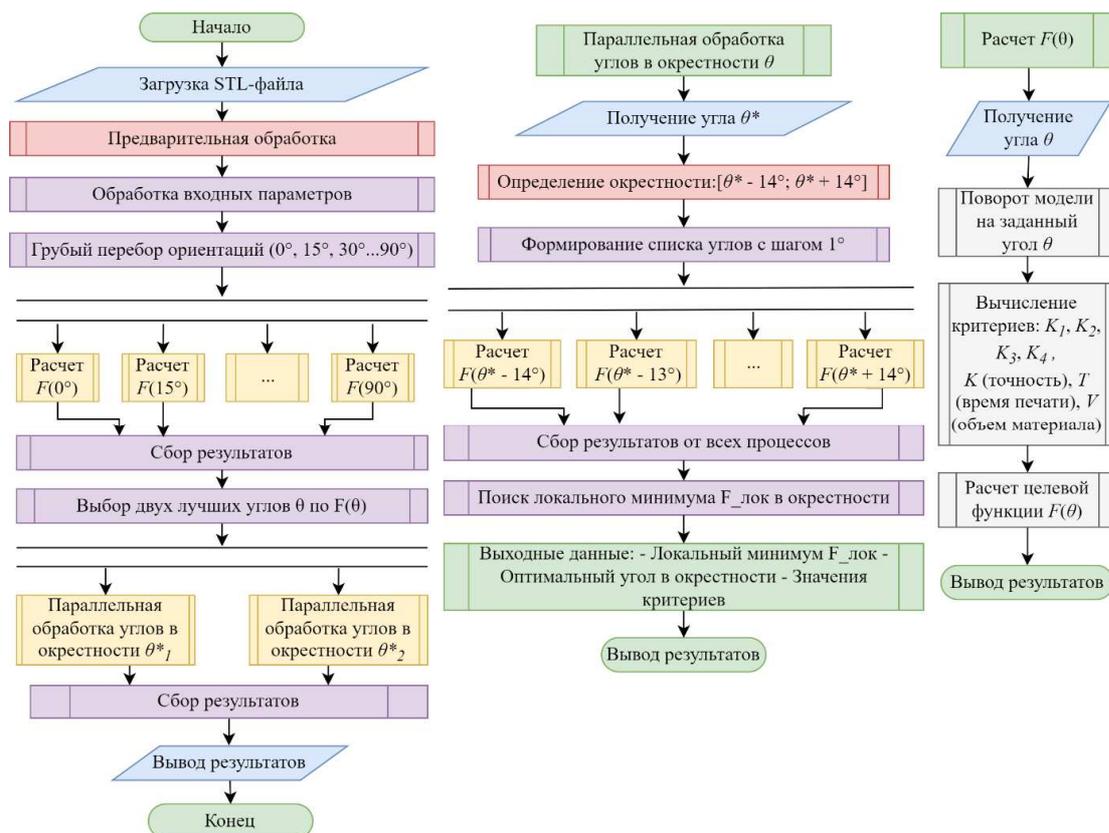


Рис.1. Схема алгоритма оптимизации ТЦЧ

После этого происходит второй этап вычислений – локальное уточнение. Для  $\theta_1^*$  и  $\theta_2^*$  происходят параллельные вычисления: определяются новые сетки углов с окрестностью  $(\theta - 14^\circ; \theta + 14^\circ)$  с шагом  $1^\circ$ ; затем по тому же алгоритму, как и при грубом переборе, параллельно вычисляются значения  $F(\theta_i^*)$  и находятся локальные минимумы. По завершению параллельных процессов из двух значений выбирается глобальный минимум.

*Заключение.*

Предложенные методы и алгоритмы решения задачи оптимизации качества, времени и объема материала за счет нахождения пространственной ориентации ТЦЧ находится на стадии программной реализации и проверки эффективности. На данный момент выполнено теоретическое сравнение с существующими решениями, представленными в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение предлагаемого метода со слайсерами

<i>Параметр</i>	<i>Тип оптимизации</i>	<i>Критерии</i>	<i>Геометрия</i>	<i>Параллелизация</i>	<i>Лицензия</i>
Предлагаемый метод	Многокрит. с адапт. поиск	Комплексн.	Цилиндры	Есть	Свободная
OrcaSlicer	6 позиций	Поддержки	Нет	Нет	Свободная
Cura	Высота и площадь	Высота и основание	Нет	Нет	Свободная
PrusaSlicer	Высота и поддержки	Высота и поддержки	Частично	Нет	Свободная
Materialise Magics	Многокрит.	Комплексн.	Да	Ограниченная	Комм. (от €3000)
Simplify3D	Эвристический поиск	Качество	Нет	Нет	Комм. (\$149)

Как следует из сравнения, дальнейшее развитие и практическая реализация предложенного метода остаются актуальными.

#### Список использованных источников

1. Mallikarjuna, B. A review on the melt extrusion-based fused deposition modeling (FDM): background, materials, process parameters and military applications / B. Mallikarjuna [et al.] // International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). – 2025. – Vol. 19, № 2. – P. 651–665.
2. Ракитин, С. Ю. Формирование послойных контуров 3D-моделей для аддитивного производства : учеб. пособие / С. Ю. Ракитин, А. А. Илькубаев ; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург : [ОСУ], 2016. – ISBN 978-5-7410-1385-4.
3. Лисяк, В. В. Обзор слайсеров для 3D-печати / В. В. Лисяк // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2022. – № 3 (227). – С. 60–74.
4. Шкуро, А. Е. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А. Е. Шкуро, П. С. Кривоногов; Минобрнауки России, Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург: [УГЛТУ], 2017. – 100 с. – Библиогр.: с. 97–98. – ISBN 978-5-94984-616-2.
5. Голунов, А. В. Анализ факторов, оказывающих влияние на нарушение геометрии изделий в процессе аддитивного построения / А. В. Голунов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 557–561.
6. Вехтева, Н. А. Повышение точности напечатанных изделий на фотополимерном принтере за счет преобразования положения в области печати / Н. А. Вехтева, Ю. В. Литовка, А. Д. Обухов // Труды МАИ. – 2024.
7. Математика: алгебра и начала математического анализа, геометрия. Геометрия: 10–11-й классы: базовый и углублённый уровни: учебник / Л. С. Атанасян, В. Ф. Бутузов, С. Б. Кадомцев [и др.]. – 11-е изд., стер. – Москва: Просвещение, 2023. – 287 с. – ISBN 978-5-09-103606-0.

УДК 62-181.12

**Волков А.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: didim@eclabs.ru

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ПОЛОТНА АДАПТИВНОЙ БЕГОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ РЕАБИЛИТИРУЮЩЕГО ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА**

**Volkov A.A.**

<sup>1</sup>Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: didim@eclabs.ru

### **SELECTING THE OPTIMAL LENGTH OF THE ADAPTIVE RUNNING PLATFORM FOR A VIRTUAL REHABILITATION TRAINING SYSTEM**

*Аннотация.* Рассматривается вопрос выбора оптимальной длины полотна адаптивной беговой платформы для реабилитирующего виртуального тренажера. Проанализированы данные, полученные в результате экспериментального исследования различных алгоритмов управления беговой платформой. Составлены рекомендации по выбору наименьшей допустимой длины платформы при эксплуатации в различных условиях.

*Ключевые слова:* опорно-двигательная реабилитация, виртуальная реальность, виртуальный тренажер, адаптивная беговая платформа.

*Abstract.* This article examines the optimal length of an adaptive running platform for a virtual rehabilitation training system. Data obtained from an experimental study of various running platform control algorithms is analyzed. Recommendations are provided for selecting the shortest permissible platform length for use in various conditions.

*Keywords:* musculoskeletal rehabilitation, virtual reality, virtual training system, adaptive running platform.

Одним из важных компонентов реабилитирующего виртуального тренажера (РВТ) является активная беговая платформа. Платформа представляет собой управляемую беговую дорожку, для которой можно задать произвольную скорость движения полотна в реальном времени. Использование такой платформы позволяет автоматически адаптировать скорость движения полотна под характер походки пользователя на начальных этапах реабилитации, а также управлять создаваемой нагрузкой на заключительных этапах.

При проектировании беговых платформ для РВТ одним из важных параметров конструкции является длина беговой платформы [1]. С одной стороны, чрезмерное увеличение длины ведет к усложнению и удорожанию конструкции, а также повышает

требования к помещению, в котором может быть размещен комплекс. С другой стороны, недостаточная длина полотна может вызвать дискомфорт пользователей, что в свою очередь приведет к снижению эффективности процесса реабилитации или вовсе сделает его невозможным. Таким образом выбор оптимальной длины полотна беговой платформы является важной задачей при проектировании РВТ.

Разрабатываемая платформа реализует два режима работы: ручной режим, в котором скорость движения полотна устанавливается с пульта оператором РВТ, а также автоматический режим, в котором скорость движения полотна подстраивается под походку пользователя. Движение в ручном режиме не требует большой длины платформы, поскольку диапазон перемещения пользователя может быть задан при помощи ограничительной разметки или физических ограничителей (поручней или барьеров), а вот для движения в автоматическом режиме необходимо определить требуемую длину рабочего отрезка. Общая схема распределения полотна на различные зоны и расположение системы координат представлено на рисунке 1.

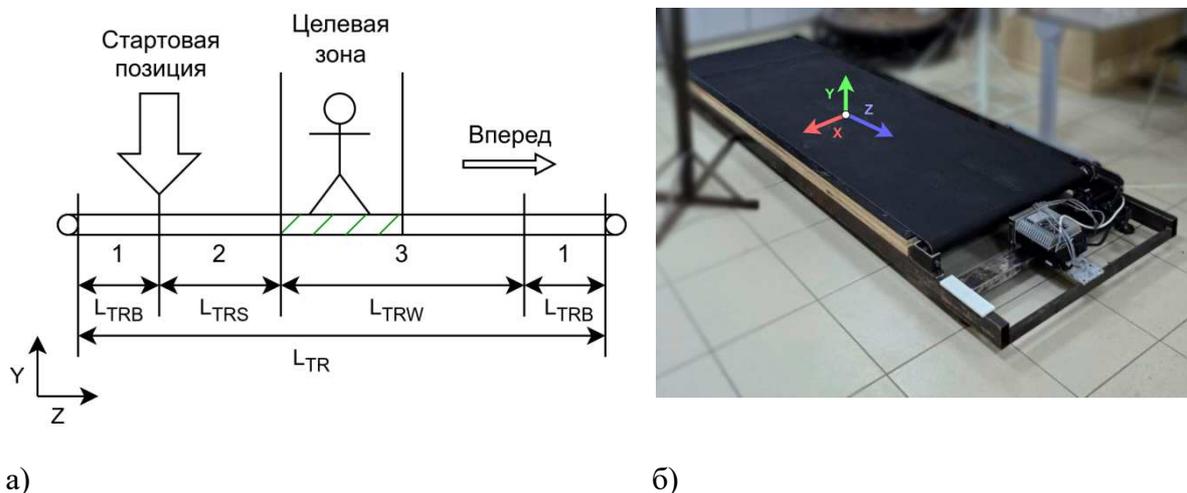


Рис. 1. Разделение беговой платформы на зоны (а) и расположение системы координат (б)

Полотно беговой платформы с общей длиной  $L_{TR}$  можно условно разделить на несколько зон (рисунок 3а): граничная зона (1) длиной  $L_{TR}$ , необходима для соблюдения правил безопасности, эта зона обеспечивает запас от краев полотна до границ зоны, в которых должен перемещаться пользователь. Зона остановки (2) длиной  $L_{TRS}$ , при нахождении пользователя в данной зоне беговая платформа останавливается. Рабочая зона (3) длиной  $L_{TRW}$ , при нахождении пользователя в данной зоне беговая платформа движется согласно выбранной функции управления. На рисунке 3б показано направление осей координат на реальной платформе.

Размер зоны (1) равен 0.3 метра, а зона (2) определена экспериментальным путем и равняется 0.1 метра. Зона (1) имеет достаточный размер, чтобы компенсировать нерабочий край дорожки и обеспечить спокойное нахождение пользователя на краю.

Зона (2) представляет собой короткий отрезок полотна, при попадании в который платформа останавливается. Для определения этой длины проверялись различные значения на этапе настройки системы. Размер 0.1 метра обеспечивает быструю остановку дорожки, едва пользователь выходит за пределы основной рабочей области. С учетом зоны (1) в 0.3 метра это дает общую величину в 0.4 метра, достаточную для зоны бездействия и остановки, даже с учетом инерции полотна дорожки.

Для определения минимально допустимого размера зоны 3 был проведен ряд испытаний с участием группы из 5-ти человек при использовании двух различных функций автоматического регулирования скорости:

$F_{LIN}(t, z)$  – линейная функция с параметром  $k_l$  (длина рабочего отрезка, равная сумме зон 2 и 3, выбирается из набора 0.5, 0.75, 1, 1.25 и 1.5 метра).

$F_{NLIN}(t, z)$  – нелинейная функция с параметрами  $k_l$  (длина рабочего отрезка, выбирается из набора 0.5, 0.75, 1 и 1.5 метра) и  $k_a$  (коэффициент нелинейности, выбирается из набора 0.3, 0.4, 0.6).

Данные функции управления были выбраны, основываясь на результатах предыдущих исследований [2, 3]. Для каждой конфигурации эксперимента проводится три прохода продолжительностью 60 секунд каждый. Испытуемому необходимо плавно набрать комфортную для себя скорость и идти на этой скорости в течение всего времени эксперимента. В качестве критерия достаточности длины рабочего отрезка выбрано количество случаев выхода пользователя за границы зоны 3 в процессе движения на комфортной скорости. На рисунке 2 показаны гистограммы с указанием числа «аварийных» случаев для линейной (а) и нелинейной (б) функций управления.

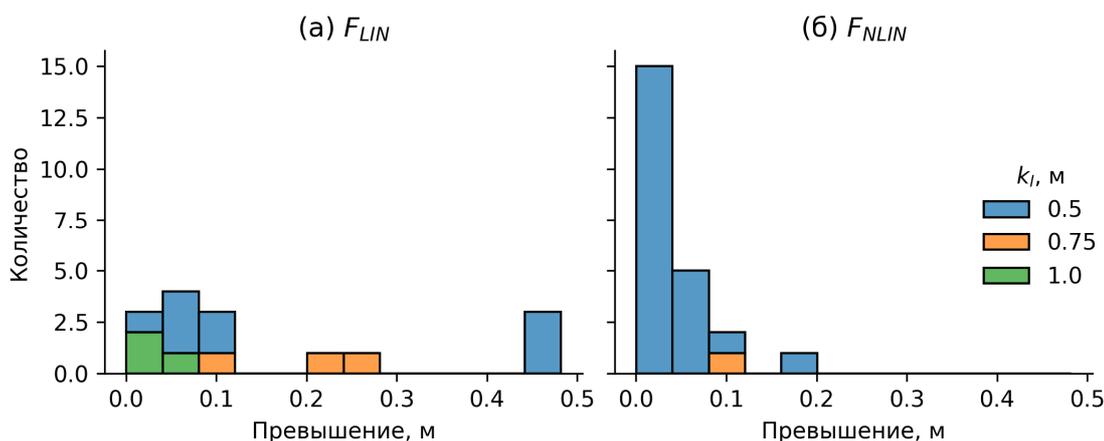


Рис. 2. Распределение количества выходов пользователя за пределы рабочей зоны

Выход пользователя из рабочей зоны означает, что функция управления не справилась со своей задачей. Всего за время эксперимента зафиксировано 38 случаев (7.7%) выхода пользователя из рабочей области, из них 31 (6.2%) при размере рабочей области 0.5 метра.

Таким образом можно сделать вывод, что рабочая область длиной 0.5 м является недостаточной для нормального функционирования системы автоматического управления. Для нелинейной функции управления минимальным допустимым значением  $k_l$  является 0.75 м, для линейной функции управления рекомендуется использовать рабочую зону не менее 1 м. С учетом обозначенных ранее размеров граничной зоны длиной 0.3 метра (используется с обеих сторон рабочей зоны) и зоны остановки в размере 0.1 метра получаем минимальный рекомендуемый размер дорожки в  $L_{TR} = 1.7$  метра. При использовании нелинейной функции возможно сокращение длины дорожки до 1.45 метра.

Полученные результаты найдут применение при разработке РВТ различной функциональности, включая возможность интеграции систем отслеживания как на основе внешних датчиков, так и на основе систем компьютерного зрения [4, 5].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№124032800018-5).*

#### Список использованных источников

1. Проектирование и тестирование беговой дорожки для опорно-двигательной реабилитации / А. С. Лопатко, Я. В. Х. Меркурьев, М. В. Рыбачок, А. Е. Архипов // *Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития : сборник статей XLV Международной научно-практической конференции*, Петрозаводск, 28 ноября 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 20-25.

2. Control of adaptive running platform based on machine vision technologies and neural networks / A. D. Obukhov, M. N. Krasnyanskiy, D. L. Dedov [et al.] // *Neural Computing & Applications*. – 2022. – Т. 34. – №. 15. – С. 12919-12946.

3. Краснянский, М. Н. Система управления адаптивной беговой платформой для перемещения в виртуальной реальности / М. Н. Краснянский, А. Д. Обухов, Д. Л. Дедов // *Автоматика и телемеханика*. – 2022. – № 3. – С. 69-83.

4. Обухов, А. Д. Отслеживание положения тела пользователя на всенаправленной дорожке / А. Д. Обухов, Д. А. Побединский, Я. В. Х. Меркурьев // *Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы X Международной научно-практической конференции*, Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 207-210.

5. Система управления адаптивной беговой платформой на основе технологий компьютерного зрения / А. Д. Обухов, К. И. Патутин, Е. О. Суркова, А. Е. Архипов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 363-374.

УДК 004.5

**Патутин К. И.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: kirill-patutin@mail.ru

## **ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ РЕАБИЛИТИРУЮЩИХ ТРЕНАЖЕРОВ**

**Patutin K. I.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: kirill-patutin@mail.ru

### **FORMALIZED STATEMENT OF THE PROBLEM OF SELECTING A HUMAN-MACHINE INTERFACE FOR REHABILITATION SIMULATORS**

*Аннотация.* В статье рассматривается задача выбора человеко-машинного интерфейса для тренажерных реабилитационных комплексов с вариативной комплектацией. Обоснован отказ от полностью адаптивных интерфейсов в пользу вариативного подхода, использующего набор предустановленных сценариев интерфейса. Такой подход обеспечивает предсказуемость, стабильность и простоту разработки, что критически важно в условиях реабилитации. Для формализации задачи выбора оптимального интерфейса предложена постановка, учитывающая три ключевых фактора: конфигурацию тренажерного комплекса, профиль оператора-пользователя и решаемую реабилитационную задачу.

*Ключевые слова:* человеко-машинный интерфейс, тренажерный комплекс, реабилитация, системный анализ, формализация задачи, оператор-пользователь.

*Abstract.* This article examines the problem of selecting a human-machine interface for training rehabilitation systems with variable configurations. A rationale is given for abandoning fully adaptive interfaces in favor of a variable approach using a set of predefined interface scenarios. This approach ensures predictability, stability, and ease of development, which are critical in rehabilitation settings. To formalize the problem of selecting the optimal interface, a formulation is proposed that takes into account three key factors: the configuration of the training system, the user profile, and the rehabilitation task being solved.

*Keywords:* human-machine interface, training complex, rehabilitation, systems analysis, task formalization, operator-user.

Современные тренажерные реабилитационные комплексы характеризуются сложной модульной архитектурой [1], что позволяет гибко варьировать их конфигурацию, в связи с этим становится актуальной задача выбора человеко-

машинного интерфейса для оператора-пользователя выбранной комплектации тренажерного комплекса. В зависимости от задач реабилитации и освоения навыков варианты комплектации комплекса могут варьироваться. В каждой комплектации есть как постоянные (инвариантные) элементы, которые работают в связке, но независимо друг от друга, такие как подсистема интерфейса оператора-инструктора комплекса, подсистема координации сообщений, подсистема сбора данных в реальном времени и подсистема хранения и управления данными, так и периодические элементы, которые жестко связаны с другим элементом системы или с определенным оборудованием, такие как, подсистема визуализации и подсистема управления. Периодические элементы предоставляют возможность варьировать способы взаимодействия с оператором-пользователем как в рамках одного тренажерного комплекса, так и в рамках некоторого их множества, от чего общая комплектация оборудования может изменяться в зависимости от выполняемой задачи.

Из-за данной возможности интерфейс общения между комплексом и оператором-пользователем должен быть либо адаптивен, либо вариативен. В случае с адаптацией, интерфейс должен динамически подстраиваться под конфигурацию комплекса и задачи оператора-пользователя, что предъявляет высокие требования к интеллектуальности системы. Необходимо фиксировать не только текущие показатели пользователя, но и анализировать текущее состояние оборудования, подключенные периодические модули и даже действия оператора-пользователя [2]. На основе этого анализа система должна в реальном времени перестраивать элементы управления, меню и визуальные подсказки, предлагая только релевантные для данной конкретной комплектации и этапа задачи инструменты. Однако такая самонастраивающаяся система сложна в разработке и отладке, а также данная автоматизация может дезориентировать оператора-пользователя резкими и непредсказуемыми изменениями человеко-машинного интерфейса [3, 4], что недопустимо в задачах реабилитации.

Поэтому на практике используется вариативный интерфейс. Он представляет собой набор предустановленных, заранее сконфигурированных сценариев человеко-машинного интерфейса для каждой комплектации и типа задач оператора-пользователя. Оператор-инструктор вручную выбирает подходящий «сценарий», который заточен под конкретный набор оборудования и реабилитационную методику. Это обеспечит предсказуемость и стабильность работы комплекса, так как оператору-инструктору будет известно какой набор функций он получит после выбора сценария и какие инструкции необходимо предоставить оператору-пользователю для выполнения реабилитационной задачи. Дополнительно следует отметить, что такой интерфейс проще в разработке и отладке, ведь каждый сценарий интерфейса заточен под уже известную конфигурацию и не требует изучения множества возможных состояний адаптивного интерфейса.

Такой вариативный подход особенно важен, учитывая различный набор характеристик каждого оператора-пользователя и реабилитационных задач, которые они выполняют [5]. К характеристикам пользователя относятся биомедицинские

(возраст, заболевание или травма, рост, вес, размер ноги), функциональные (сила мышц, мышечный тонус, наличие и степень болевого синдрома) и когнитивные (внимание, память, скорость обработки информации) особенности.

С точки зрения реабилитационных задач следует учитывать их тип (например, восстановление двигательной активности, улучшение координации или развитие мелкой моторики), требуемую точность движений, сложность, энергозатратность и этап реабилитационного процесса (начальный, основной, закрепляющий).

Таким образом, задача выбора оптимального интерфейса сводится к поиску такого сценария из доступного множества, который наилучшим образом согласуется с текущей конфигурацией тренажера, профилем пользователя и решаемой им задачей, максимизируя при этом ключевые показатели эффективности взаимодействия. Для формализации этой задачи введем следующие множества и критерии.

Пусть:

- $TC$  – конфигурация тренажерного комплекса (набор модулей и используемого оборудования)

- $OU$  – профиль оператор-пользователь (набор биомедицинских, функциональных и когнитивных характеристик)

- $UT$  – реабилитационная задача решаемая в тренажерном комплексе

- $UI^*$  – это множество доступных сценариев интерфейса

- Критерии оценки сценария интерфейса:

- $U$  – удобство использования интерфейса. Отражает эргономичность, интуитивность и эффективность взаимодействия оператора-пользователя с интерфейсом. Основными метриками данного критерия являются среднее время реакции пользователя на требуемую задачу, количество ошибочных действий пользователя из-за интерфейса и оценка удовлетворенности.

- $I$  – уровень мотивации и заинтересованности пользователя. Основной метрикой является уровень заинтересованности, формируется на основе опроса оператора-пользователя

- $E$  – экономические затраты на реализацию интерфейса в рамках комплекса. Основными метриками являются трудоемкость разработки в человеко-часах, стоимость различных лицензионных объектов (шрифтов, моделей и т.д.)

- $Q$  – качество отображаемых элементов (моделей, картинок, шрифтов). Оценивает техническое и визуальное исполнение интерфейса. Основными метриками являются частота кадров, время отклика на действие, уровень детализации объектов (моделей, шрифтов и т.д.)

Таким образом формализованная постановка задачи имеет следующий вид: найти такие параметры человеко-машинного интерфейса из множества  $UI^*$  для выбранной структуры тренажерного комплекса  $TC$ , его оператора-пользователя  $OU$  и выполняемого реабилитационного задания  $UT$ , при котором целевая функция  $F$  и критерии удобства  $U$ , заинтересованности  $I$ , экономических затрат  $E$  и качества  $Q$  стремятся к собственным экстремальным значениям:

$$UI^* = \arg \max_{UI} F(TC, OU, UT)$$

$$U(UI, TC, OU, UT) \rightarrow \max,$$

$$I(UI, TC, OU, UT) \rightarrow \max,$$

$$Q(UI, TC, OU, UT) \rightarrow \max,$$

$$E(UI, TC, OU, UT) \rightarrow \min.$$

В ходе проведенного исследования была решена поставленная задача по обоснованию и формализации выбора человеко-машинного интерфейса для тренажерных реабилитационных комплексов с переменной конфигурацией, его оператора-пользователя и выполняемого реабилитационного задания

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№124032800018-5).*

#### Список использованных источников

1. Volkov A., Obukhov A. et al. Structural model of the microservice architecture of the control system for training complexes //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – Т. 2910. – №. 1.
2. Feigh K. M., Dorneich M. C., Hayes C. C. Toward a characterization of adaptive systems: A framework for researchers and system designers //Human factors. – 2012. – Т. 54. – №. 6. – С. 1008-1024.
3. Gajos K. Z. et al. Predictability and accuracy in adaptive user interfaces //Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. – 2008. – С. 1271-1274.
4. Findlater L., McGrenere J. A comparison of static, adaptive, and adaptable menus //Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems. – 2004. – С. 89-96.
5. Patutin, K., Obukhov, A. (2025). Evaluation of Ergonomics in Human-Machine Interfaces of Professional Virtual Simulators. In: Silhavy, R., Silhavy, P. (eds) Software Engineering: Emerging Trends and Practices in System Development. CSOC 2025. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1564. Springer, Cham.

УДК 621.865

**Чупахин И.А., Гребенникова Н.М.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: ivanchupa1709@yandex.ru,

### **УМНАЯ ТЕЛЕЖКА ДЛЯ ОФИСА**

**Chupakhin I.A., Grebennikova N.M.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: ivanchupa1709@yandex.ru

### **SMART TROLLEY FOR OFFICE**

*Аннотация.* Умная тележка – это инновационное решение для автоматизации внутриофисных логистических процессов. Она предназначена для перевозки документов, канцелярских принадлежностей и других небольших грузов между отделами, освобождая сотрудников от рутинных задач.

*Ключевые слова:* умная тележка, офисная автоматизация, Arduino UNO, мотор-редуктор, сервопривод.

*Abstract.:* Smart cart is an innovative solution for automating in-office logistics processes. It is designed to transport documents, office supplies and other small cargo between departments, freeing employees from routine tasks.

*Keywords:* smart cart, office automation, Arduino UNO, gear motor, servo.

В современных офисах, где эффективность и скорость работы имеют ключевое значение, автоматизация рутинных процессов становится не просто полезным дополнением, а важной составляющей успешного бизнеса. Именно таким решением является умная тележка – инновационный помощник, способный самостоятельно перевозить документы, канцтовары и другие небольшие грузы между отделами, освобождая сотрудников от рутинных задач и позволяя им сосредоточиться на более важных делах.

Основу конструкции тележки составляют четыре прочные платформы, которые служат надежным основанием для всех остальных элементов. Для плавного и устойчивого передвижения используются четыре колеса диаметром 80 мм, приводимые в движение двумя мощными мотор-редукторами. Управление всей системой осуществляется через контроллер Arduino UNO R3, работающий в паре с платой расширения Motor Shield 298P – это сочетание обеспечивает точное управление движением, включая регулировку скорости и направления.

Важной частью тележки является ее энергосистема, включающая блок аккумуляторов с проводами, индикатор заряда 2S и блок питания 9В для подзарядки.

Благодаря этому устройство может работать автономно в течение длительного времени. Особенностью тележки является Bluetooth-модуль HC-06, позволяющий управлять ею дистанционно с помощью смартфона или планшета. Это делает использование тележки максимально удобным и интуитивно понятным. Дополнительные возможности открывает сервопривод MG996R, который можно запрограммировать для выполнения различных механических действий, например, подъема или опускания груза.

Тележка оснащена всеми необходимыми компонентами для удобного наблюдения за ее работой: светодиодами для индикации состояния, выключателем KCD1-11 для быстрого включения и выключения, боковыми частями с разъемом питания, а также креплениями для мотор-редукторов и полным набором крепежных элементов. Это делает сборку и эксплуатацию устройства простой и доступной даже для тех, кто не имеет большого опыта в робототехнике.

Собранная тележка найдет широкое применение в различных офисных сценариях. Она идеально подходит для доставки документов между отделами, транспортировки образцов продукции во время презентаций или перевозки небольших грузов в пределах офиса. При необходимости конструкцию можно легко модернизировать, добавив датчики препятствий для автоматического объезда объектов или голосовое управление для еще большего удобства.

#### Список использованных источников

1. Дубинина В. В. Анализ тенденций развития логистических роботов //Анализ и моделирование экономических и социальных процессов-МКО-2022. – 2022. – С. 114-122.
2. Маликова Т. Склады и складская логистика. Учебное пособие для вузов. – Litres, 2021.
3. Михайлов Е. П., Ременюк Б. С. Оптимизация размещения складской транспортной системы //Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – №. 18. – С. 60-64.

УДК 004.853

**Илясов А.А., Татаринцев А.В., Попов А.В., Немтинов В.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: aleksandarilyasoff@yandex.ru

## **ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦЕХА МЕХАНООБРАБОТКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОГО ПОМОЩНИКА НАЛАДЧИКА ОБОРУДОВАНИЯ**

**Ilyasov A.A., Tatarincev A.V., Popov A.V., Nemtinov V.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: aleksandarilyasoff@yandex.ru

## **A VIRTUAL MODEL OF A MACHINING WORKSHOP FOR CREATING A DIGITAL ASSISTANT FOR AN EQUIPMENT ADJUSTER**

*Аннотация.* Статья посвящена разработке виртуальной модели производственного цеха механообработки использованием программного обеспечения Twinmotion. Актуальность проекта обусловлена растущей потребностью промышленности в цифровых двойниках для решения задач виртуального планирования, обучения персонала и демонстрации мощностей. В работе описаны основные этапы создания виртуальной среды: от построения планировки и расстановки оборудования до настройки освещения и формирования сцен для навигации. В результате был создан функциональный тур, который наглядно демонстрирует расстановку станков и организацию складской оснастки, что подтверждает эффективность применения подобных решений для оптимизации производственных процессов.

*Ключевые слова:* 3D-тур, виртуальный цех, Twinmotion, цифровой двойник, производственное планирование, визуализация.

*Abstract.* The article is devoted to the development of a virtual model of a mechanical processing workshop using the Twinmotion software. The relevance of the project is due to the growing industry demand for digital counterparts to solve the tasks of virtual planning, staff training and capacity demonstration. The paper describes the main stages of creating a virtual environment: from planning and arranging equipment to setting up lighting and creating scenes for navigation. As a result, a functional tour was created that clearly demonstrates the arrangement of machines and the organization of storage equipment, which confirms the effectiveness of using such solutions to optimize production processes.

*Keywords:* 3D tour, virtual workshop, Twinmotion, digital twin, production planning, visualization.

В современном мире технологий, 3D туры становятся все более популярными в различных отраслях, включая производство. Они позволяют не только продемонстрировать оборудование и процессы, но и создать интерактивный опыт для посетителей. В этой статье мы рассмотрим, как 3D туры могут быть использованы для представления производственных цехов с станками и остатками, а также обратим внимание на историю и развитие этой технологии. Реальный прорыв произошел с развитием компьютерной графики в 1990-х и 2000-х годах. Появление виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR) открыло новые горизонты для создания интерактивных туров. С начала 2010-х годов 3D туры начали активно использоваться в маркетинге и образовании. Компании стали применять их для демонстрации своих продуктов и услуг, а также для обучения сотрудников. Например, в 2015 году Google запустил проект «GoogleStreetView», который позволил пользователям исследовать различные места по всему миру в режиме 360 градусов [1, 2].

Создание эффективного цифрового помощника наладчика оборудования предполагает последовательное прохождение нескольких технологических этапов.

*Этап 1:* создание фотореалистичной цифровой модели цеха. Данный этап является фундаментальным и заключается в построении точной и визуально достоверной 3D-копии реального производственного пространства (см. рис. 1). Работа ведется в программной среде для визуализации и реализуется по следующему алгоритму:



а)

б)

Рис.1(а, б). Визуализация виртуальной модели цеха – а), токарного станка – б)  
 – сбор исходных данных и моделирование: За основу берутся точные чертежи цеха, паспортные данные оборудования и фотоматериалы. На их базе создается трехмерная геометрия всего помещения, включая архитектурные элементы (колонны, ворота, подвесные потолки), инженерные коммуникации и, что наиболее важно, станки и стеллажи с оснасткой. Моделирование может выполняться как непосредственно в среде визуализации с использованием примитивов, так и в специализированных САПР (системах автоматизированного проектирования) с последующим импортом готовых, детализированных моделей станков;

– текстурирование и настройка материалов: Для достижения фотореализма объектам назначаются физически корректные материалы (PBR-материалы). Это

подразумевает настройку не только цвета, но и таких параметров, как шероховатость, металличность и рельеф (normal map). Поверхности станков получают характерный для металла блеск и следы эксплуатации, бетонный пол — шероховатость и неровности, а пластиковые элементы — соответствующий ей вид. Это позволяет максимально приблизить виртуальную среду к реальной, что критически важно для эффекта погружения;

– расстановка и освещение: Модели оборудования и оснастки расставляются в соответствии с планировкой реального цеха. Финальным шагом является настройка освещения, которое имитирует естественный свет из оконных проемов и искусственный — от промышленных светильников. Правильно выстроенный свет расставляет акценты, усиливает глубину сцены и окончательно стирает грань между моделью и реальностью, подготавливая основу для следующего этапа.

*Этап 2:* разработка модели информационной поддержки принятия решений для наладчиков станочного оборудования. Второй этап трансформирует статичную визуальную модель в интеллектуальный тренажер-помощник. Его цель — обеспечить наладчиков инструментом для отработки навыков и принятия решений в смоделированных, но приближенных к реальности условиях:

– внедрение интерактивных сценариев на базе неисправностей: Для каждого виртуального станка разрабатывается библиотека типовых нештатных ситуаций, с которыми сталкивается наладчик в своей работе. Примеры сценариев: «Ошибка ЧПУ: Перегрузка по оси X», «Биение шпинделя», «Нетоконечный конец пружины захвата», «Сбой калибровки инструментальной тележки». Пользователь, взаимодействуя с моделью станка, инициирует один из таких сценариев.

– создание системы диагностики и обратной связи: При активации сценария перед пользователем появляется интерфейс с описанием проблемы и несколькими вариантами действий для ее устранения. Эти варианты включают как верную последовательность шагов (например, «Проверить натяжение приводных ремней -> Осмотреть подшипниковый узел -> Выполнить балансировку»), так и типичные ошибочные решения. После выбора варианта система предоставляет развернутую обратную связь: почему действие было правильным или к каким последствиям привела бы ошибка. Это формирует у обучающегося не просто знание, а глубокое понимание причинно-следственных связей в работе оборудования.

Таким образом, пройдя эти два этапа, проект превращается из наглядной демонстрационной модели в мощный образовательный ресурс, обеспечивающий эффективную передачу практического опыта и значительное повышение квалификации инженерно-технического персонала [3].

3D тур по производству применяется при: демонстрации оборудования, обучении сотрудников, в маркетингах и продажах и в удалённых доступах:

1) Демонстрация оборудования: 3D туры позволяют потенциальным клиентам и партнерам увидеть оборудование в действии. Это особенно важно для компаний, которые производят сложные машины или станки. Посетители могут «прогуляться» по

цеху, увидеть, как работают станки, и понять весь процесс производства. Однако настоящая ценность проекта раскрывается при его использовании в качестве интерактивного обучающего тренажера для наладчиков, операторов и студентов инженерных специальностей. Такой подход выводит визуализацию на качественно новый уровень:

- *имитация реальных производственных ситуаций*: пользователь может подойти к виртуальной модели станка и не просто рассмотреть ее, а столкнуться со смоделированной неисправностью (например, «Ошибка E-05: Перегрузка по оси X»). Его задача — проанализировать ситуацию и выбрать правильный алгоритм действий из нескольких предложенных вариантов.
- *формирование практических навыков*: система позволяет отрабатывать последовательности действий по наладке и переналадке оборудования, проверке точности и проведению регулярного технического обслуживания оборудования без риска повреждения дорогостоящего станка и простоев в реальном производстве.
- *погружение в профессию*: такой формат не только учит решать конкретные задачи, но и пробуждает интерес к инженерной деятельности. Студенты на практике видят, с какими вызовами сталкивается наладчик, и понимают логику работы сложных систем, что способствует осознанному выбору профессии и более качественной подготовке кадров для современного производства.

2) Обучение сотрудников: новые сотрудники могут пройти виртуальный тур по цеху, чтобы ознакомиться с оборудованием и процессами без необходимости физического присутствия. Это особенно полезно в условиях ограниченного времени или ресурсов.

3) Маркетинг и продажи: компании могут использовать 3D туры на своих веб-сайтах или в социальных сетях для привлечения клиентов. Интерактивный контент часто более привлекателен, чем традиционные видео или фотографии.

4) Удаленный доступ: в условиях глобализации и удаленной работы 3D туры позволяют потенциальным клиентам из разных уголков мира ознакомиться с производственными мощностями компании без необходимости поездок.

*Заключение.* Виртуальные модели цехов механообработки представляют собой мощный инструмент для демонстрации производственных процессов. Они не только помогают в обучении сотрудников и маркетинге, но и создают уникальный опыт для клиентов. С развитием технологий можно ожидать, что использование 3D туров будет только расти, открывая новые возможности для бизнеса.

#### Список использованных источников

1. Иванов, А.В. Цифровые двойники в промышленности: от концепции к внедрению / А.В. Иванов, Б.С. Петров. – Москва : Изд-во «Техносфера», 2022. – 300 с.
2. Сидоров, К.А. Визуализация архитектуры и дизайна в реальном времени / К.А. Сидоров. – Санкт-Петербург : Питер, 2021. – 250 с.
3. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

УДК 681.5.08

**Селиванова З. М., Скоморохов К. В.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: selivanova\_zm@mail.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ СРЕДСТВОМ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Selivanova Z. M., Skomorokhov K. V.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: selivanova\_zm@mail.ru

**MATHEMATICAL MODEL FOR ASSESSING THE ACCURACY OF  
DETERMINING THERMAL CONDUCTIVITY OF SOLID MATERIALS BY AN  
INTELLIGENT MEASUREMENT TOOL**

*Аннотация.* Проведен анализ факторов, влияющих на погрешность измерения теплопроводности твердых материалов, разработаны математическая модель и алгоритм оценки точности определения теплопроводности объектов исследования с использованием интеллектуального средства измерений.

*Ключевые слова:* оценка точности, математическая модель, теплопроводность материалов, алгоритм функционирования, интеллектуальное средство измерений.

*Abstract.* An analysis of the factors influencing the measurement error of the thermal conductivity of solid materials was conducted, and a mathematical model and algorithm for assessing the accuracy of determining the thermal conductivity of research objects using an intelligent measuring instrument were developed.

*Keywords:* accuracy assessment, mathematical model, thermal conductivity of materials, operating algorithm, intelligent measuring instrument.

Точность измерения теплопроводности твердых материалов с использованием интеллектуального средства измерений (ИСИ) определяется совокупностью факторов, включающих аппаратную составляющую, алгоритмы обработки данных, методы калибровки и условия проведения экспериментов. Ключевым аспектом является обеспечение минимальной погрешности при сохранении высокой скорости измерений, что особенно важно для промышленных применений, таких как контроль качества композитных материалов в аэрокосмической отрасли или диагностика тепловой защиты энергетических установок.

Основу оценки точности интеллектуального средства измерений составляет комплексный подход, объединяющий метрологический анализ, статистическую обработку данных и верификацию результатов на эталонных образцах. Например, для

термографических методов неразрушающего контроля, широко применяемых для оценки теплопроводности, погрешность измерений может варьироваться от 3% для однородных материалов и до 10% для анизотропных композитов, что обусловлено сложностью учета краевых эффектов, нелинейностью тепловых потоков и воздействующих шумов.

Важным этапом оценки точности является калибровка интеллектуального средства измерений с использованием эталонных материалов, чьи теплофизические свойства сертифицированы в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [1]. Для минимизации погрешностей в ИСИ внедряются алгоритмы машинного обучения, обученные на синтетических данных, генерируемых методом Монте-Карло. Моделирование  $10^4$  виртуальных экспериментов с вариацией параметров (погрешность датчиков  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ , нестабильность мощности нагревателя  $\pm 2\%$ , отклонение геометрии образца  $\pm 0.1$  мм) позволяет построить карту распределения неопределенностей и скорректировать результаты в реальном времени. Например, применение нейросетевой модели с тремя скрытыми слоями (256, 128, 64 нейрона) снизило погрешность определения теплопроводности углепластика с 6.2% до 4.7% за счет учета нелинейных зависимостей между входными сигналами и выходными параметрами.

Особое внимание уделяется анализу вклада отдельных компонентов ИСИ в общую погрешность. Основные источники неопределенности включают:

- датчики температуры: погрешность  $\pm 1^\circ\text{C}$  (2% от диапазона 0–50 $^\circ\text{C}$ ), дрейф  $\pm 0.1^\circ\text{C}/\text{час}$ ;
- алгоритмы обработки изображений: ошибка выделения тепловых аномалий из-за шумов ( $\pm 1.5\%$ );
- модели теплопроводности: упрощение граничных условий (до 3.5% погрешности);
- внешние факторы: конвективные потери ( $\pm 2.8\%$ ), нестабильность окружающей температуры ( $\pm 1.2\%$ ).

Суммарная погрешность, рассчитанная по формуле квадратичного суммирования, составляет  $\pm 5.1\%$ , что соответствует требованиям для термографического неразрушающего контроля. Важным аспектом повышения точности ИСИ является интеграция адаптивных алгоритмов, способных динамически корректировать параметры измерений. Например, реализация алгоритма рекуррентной нейронной сети (RNN) для прогнозирования тепловых полей в режиме реального времени позволила сократить временную задержку обработки данных с 2.3 до 0.8 секунд при сохранении точности  $\pm 4\%$ . Кроме того, использование облачных баз данных при определении параметров теплофизических свойств материалов (теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность) обеспечивает автоматический подбор оптимальных режимов измерений, снижая влияние человеческого фактора [2].

Применяемое интеллектуальное средство измерений теплопроводности материалов разработано на основе комплексного решения, объединяющего специализированную архитектуру ИСИ, математические модели и адаптивные алгоритмы для

неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. Ключевым достижением является значительное повышение точности измерений в условиях неопределенности, что подтверждается снижением погрешности определения теплопроводности до 4% и сокращением времени обработки данных. Применение методов машинного обучения и комплексного анализа погрешностей обеспечивает ИСИ соответствие предъявляемым промышленным требованиям и возможность эффективного использования в наиболее важных областях промышленности, таких как аэрокосмическая отрасль и энергетика.

Результаты экспериментальных исследований ИСИ позволили разработать модель оценки точности определения теплопроводности материалов экспериментально-статистическим методом. Математическая модель оценки точности приведена в виде функционала:

$$M_T = F\langle Q, G, U, O \rangle,$$

где  $M_T$  - модель оценки точности определения теплопроводности объектов исследования,  $F$  – функционал,  $Q$  – результат измерения теплопроводности,  $G$  – ряд ограничений на погрешность измерения,  $U$  – режимные параметры теплофизического эксперимента,  $O$  – оценка точности неразрушающего контроля теплопроводности объектов.

Разработана структура интеллектуального средства измерений, представленная на рис. 1 [3-5].

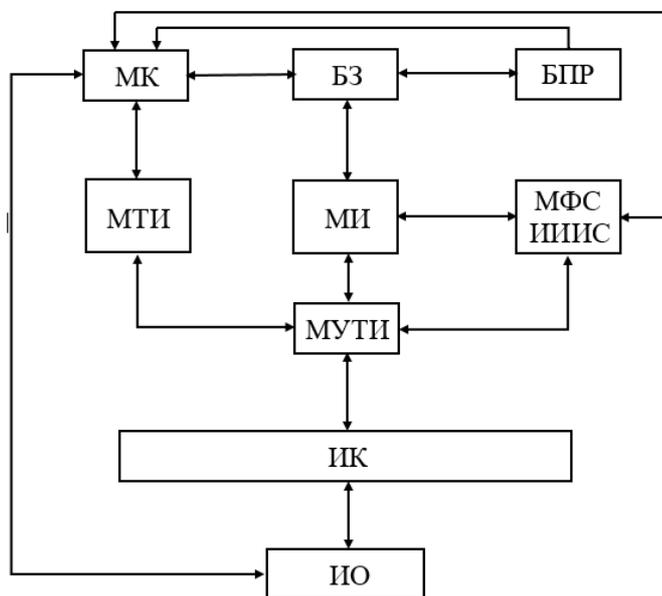


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального средства измерений теплопроводности твердых материалов: МК – микроконтроллер, БЗ - база знаний, БПР – блок принятия решений, МТИ – модуль теплофизических измерений, МИ – модуль информационный, МФС – модуль формирования структуры ИСИ, МУТИ модуль управления теплофизическими измерениями, ИК – измерительный канал, ИО – исследуемый объект

Интеллектуальное средство измерений реализовано на базе микроконтроллера в созданной информационной среде. Разработан алгоритм функционирования ИСИ с использованием данных информационных модулей, содержащих априорные и данные экспериментальных исследований теплопроводности различных видов материалов (априорных и анизотропных) с использованием ИСИ.

Разработанное программное обеспечение позволяет реализовать алгоритм функционирования ИСИ и принимать решение в условиях неопределенности при выборе режимных параметров теплофизических экспериментов, а также проводить оценку точности определения теплопроводности материалов с использованием предложенной математической модели.

#### Список использованных источников

1. РМГ 43–2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». Рекомендации межгосударственные. Введ. 2003-01-01. – М.: Стандартинформ, 2003. 38 с.
2. ГОСТ 34374.2 – 2017. Пластмассы. Определение теплопроводности и температуропроводности. Введ. 2017-11-30. – М.: Стандартинформ, 2018. 23 с.
3. Селиванова, З. М. Оперативный неразрушающий контроль теплопроводности материалов в строительной промышленности / З. М. Селиванова, К. В. Скоморохов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2022, № 3. – С. 85-92.
4. Селиванова З. М., Скоморохов К. В. Идентификация измерительной ситуации при неопределенности теплофизических измерений // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 516-527. DOI: 10.17277/vestnik.2021.04.pp.516-527.
5. Селиванова, З. М. Информационная и математические модели для прогнозирования надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов / З. М. Селиванова, К. В. Скоморохов // Надежность и качество сложных систем. – 2022 г. – № 2 (38). – С. 61-69. DOI:10.21685/2307-4205-2022-2-7.

УДК 4.009

**Санников С.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: sannikov@tagat.ru

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЛИНИЙ**

**Sannikov S.A.**

Tambov State Technical University, Tambov, Russia  
e-mail: sannikov@tagat.ru

### **SETTING THE TASK OF DESIGNING GALVANIC LINES**

*Аннотация.* Представлена постановка оптимизационной задачи проектирования гальванических линий. В качестве критерия оптимизации используются приведенные затраты. Искомыми переменными являются структура гальванической линии и основные параметры оборудования на каждой операции.

*Ключевые слова:* автоматизированное проектирование, гальванические линии, приведенные затраты.

*Abstract.* The formulation of the optimization problem of designing galvanic lines is presented. The specified costs are used as an optimization criterion. The desired variables are the structure of the galvanic line and the basic parameters of the equipment at each operation.

*Keywords:* computer-aided design, galvanic lines, reduced costs.

Гальванические покрытия широко применяются для обеспечения коррозионной стойкости изделий, улучшения их внешнего вида, износостойкости и др. Существует много типов гальванических покрытий: хромирование, цинкование, никелирование и др. Процесс гальванопокрытия осуществляется по определенной технологии, которая определяет необходимые операции: подготовка поверхности, собственно покрытие, сушка и др. Эти операции осуществляются последовательно в предназначенных для этого технологических ваннах. Последовательно установленные ванны и дополнительное оборудование необходимые для осуществления проведения операций, которые определены технологией покрытия, представляют собой гальваническую линию (ГЛ).

Проектирование ГЛ включает в себя следующие основные стадии: структурный синтез – из каких основных элементов будет состоять ГЛ, определение параметров элементов ГЛ и изготовление конструкторской документации [1]. При этом

необходимо выбрать такую структуру и такие параметры элементов ГЛ, которые бы обеспечили низкую себестоимость линии и затраты на ее эксплуатацию.

Таким образом, вербальная поставка задачи проектирования ГЛ формулируется следующим образом. Для заданной технологии гальванопокрытия, изделий, которые необходимо обработать, и производительности ГЛ (количество обрабатываемых изделий в единицу времени) необходимо из множества возможных элементов ГЛ выбрать такие, которые обеспечат экстремум критерию эффективности ГЛ. В качестве критерия эффективности будем использовать приведенные затраты.

Обозначим:

$T = \{t_i\}, i = 1..I$  – технологические операции процесса гальванопокрытия (промывка, хромирование и др.);

$TR = \{tr_i\}, i = 1..I$  – требования, предъявляемые к оборудованию на операции;

$D = \{d_n\}, n = 1..N$  – характеристики обрабатываемых деталей (поверхность, форма, материал, толщина покрытия, число обрабатываемых деталей в месяц);

$GL = \{gl_i\}, i = 1..I$  – гальванические линии,  $gl_i \subset G_i \subset GG$  – характеристики оборудования на  $i$ -ой операции (материал ванны, размер ванны, число ванн и др.).  $G_i$  – множество допустимого оборудования на  $i$ -ой операции,  $GG$  – множество оборудования, используемое в гальванических линиях.

Задача проектирования гальванической линии ставится следующим образом. Для заданных  $T, TR, D$  найти  $GL^* = \{gl_i^*\}, i = 1..I$ , которая доставляет минимум приведенным затратам,  $PZ$ .

$$PZ(GL^*) = \min(PZ(GL)),$$

$$PZ(GL) = E_n K(GL) + C(GL),$$

где  $K(GL)$  – капитальные затраты,  $C(GL)$  – эксплуатационные затраты,  $E_n$  – нормативный коэффициент окупаемости.

Оборудование на каждой операции выбирается из множества допустимого оборудования  $G_i, i = 1..I$ , которое является функцией технологических операций, требований и характеристик обрабатываемых деталей

$$G_i = F(t_i, tr_i, D) \tag{1}$$

Выражение (1) представляет собой формальное описание модели, которая реализована в виде онтологии в [2].

Эксплуатационные затраты очень сильно зависят от количества используемой промывной воды, расчет которого представлен в [3].

Описанная постановка задачи используется при разработке учебно-промышленной автоматизированной системы проектирования технологического оборудования [5-6], которая создается с участием автора.

## Список использованных источников

1. Санников, С. А. Системный анализ процесса проектирования линий для электрохимической и химической обработки деталей / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб, М. С. Калистратов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 6-16. – DOI 10.17277/vestnik.2023.01.pp.006-016. – EDN IUUWBD.
2. Мокрозуб, В. Г. Онтологический подход к структурному синтезу гальванических линий / В. Г. Мокрозуб, С. А. Санников // Системы управления и информационные технологии. – 2025. – № 2(100). – С. 82-87. – EDN XXBISQ
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613605 Российская Федерация. Поддержка принятия решения выбора схем промывок гальванической линии : заявл. 05.02.2025 : опубл. 13.02.2025 / С. А. Санников, В. Г. Мокрозуб ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет». – EDN QRCNYT.
4. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
5. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326-331. – DOI 10.1007/s10556-017-0342-6. – EDN XNSPGA.
6. Мокрозуб, В. Г. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника / В. Г. Мокрозуб, А. А. М. Альсаиди // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 4(54). – С. 595-606. – DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606. – EDN DNJZFN.

УДК 621.833

**Соболев Е.А.<sup>1</sup>, Соколов М.В.<sup>3</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: esobolev902@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: msok68@mail.ru

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА  
С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ, НАНОСИМЫМ НА  
ОПТИМИЗИРОВАННУЮ МЕТОДОМ SLM ОСНОВУ**

**Sobolev E.A.<sup>1</sup>, Sokolov M.V.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: esobolev902@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: msok68@mail.ru

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A HYBRID GEAR  
WITH A WEAR-RESISTANT COATING APPLIED TO AN  
OPTIMIZED BASE USING THE SLM METHOD**

*Аннотация.* В данной статье рассмотрена технология 3D печати. Комбинирование материалов и процессов для создания высокопроизводительных зубчатых колес.

Предложена концепция гибридного зубчатого колеса, где несущая основа (тело колеса), топологически оптимизированная для минимальной массы, изготовленная методом селективного лазерного сплавления SLM.

Произведены расчеты основных сравнительных характеристик предложенного варианта изготовления зубчатого колеса.

*Ключевые слова:* 3D принтер, 3D печать, Аддитивные технологии, Селективное лазерное плавление, Холодное газодинамическое напыление.

*Abstract.* This article discusses 3D printing technology. Combining materials and processes to create high-performance gears.

The concept of a hybrid gear wheel is proposed, in which the base (wheel body), topologically optimized for minimal weight, is manufactured using SLM selective laser synthesis technology.

Calculations of the main comparative characteristics of the proposed gear manufacturing option have been carried out.

*Keywords:* 3D printer, 3D printing, Additive technologies, Selective Laser Melting (SLM), Cold Spray

3D печать металлом – технология, позволяющая создавать объёмные металлические изделия по цифровым моделям, без использования традиционных штампов, прессов и фрез. В отличие от классической обработки, где излишки материала удаляются, при 3D-печати металл наносится послойно, что позволяет экономить ресурсы и создавать геометрически сложные детали [1].

Аддитивные технологии – это одна из инновационных технологий современности, которая продолжает все больше развиваться. На сегодняшний день технология трехмерной (3D) и послойной печати все чаще внедряется в производство из-за своей

уникальности: создавать трёхмерные объекты любой сложности и формы с применением данной технологии, так и с помощью 3D принтера. Эта технология может быть успешно внедрена в производство зубчатых колес различной конфигурации [2].

Растущие требования к удельным характеристикам (прочность/масса) и ресурсу деталей в таких отраслях как: аэрокосмическая, робототехника и высокоскоростные приводы. Способствует дальнейшей модернизации существующих процессов изготовления различных частей и агрегатов, узлов машин на производстве.

Зачастую конфликт требований между минимальной массой (легкие сплавы) и высокой износостойкостью (твердые стали). Ограниченность традиционных методов (например, цементация) для сложно оптимизированных деталей.

Совокупно это стимулирует к применению аддитивных технологий для создания легких и прочных конструкций. Имеет место использования метода холодного газодинамического напыления для и упрочнения деталей.

Создание гибридных зубчатых колес с количественной оценкой ресурса является новым и актуальным направлением.

В данной работе предложена концепция гибридного зубчатого колеса, где несущая основа (тело колеса), топологически оптимизированная для минимальной массы, изготавливается из алюминиевого сплава AlSi10Mg методом селективного лазерного сплавления SLM [3].

На рабочие поверхности зубьев после печати, последующей механической обработки (фрезерование для обеспечения точности) и пескоструйной обработки методом холодного газодинамического напыления (Cold Spray, CS) наносится износостойкое покрытие на основе порошка сплава CuAl10Fe3.

Проведено моделирование термомеханических нагрузок, оценена адгезия покрытия к основе.

Предварительные результаты испытаний на износ показали значительное повышение ресурса гибридного колеса по сравнению с цельнометаллическим алюминиевым аналогом при существенно меньшей массе.

Предварительные результаты испытаний на контактную выносливость и абразивный износ показали, что гибридное колесо превосходит по ресурсу цельнометаллическое алюминиевое аналог в 4.2 раза, а его масса на 58% меньше, чем у стального колеса аналогичной нагрузочной способности.

Произведем расчеты основных сравнительных характеристик предложенного варианта изготовления зубчатого колеса.

Исходные данные:

Передаваемый момент:  $T = 100$  Нм; Число зубьев шестерни:  $z_1 = 20$ .

Число зубьев колеса:  $z_2 = 60$ ; Модуль зацепления:  $m = 2$  мм.

Материал основы (после SLM): AlSi10Mg;  $\sigma_b = 330$  Мпа;  $\sigma(0.2) = 220$  Мпа.

Материал покрытия: CuAl10Fe3;  $\sigma_b = 650$  Мпа;  $\sigma(0.2) = 280$  Мпа.

Расчет окружной силы:

$$P = 2 * T / d_1,$$

где  $d_1 = m * z_1 = 2 * 20 = 40 \text{ мм} = 0.04 \text{ м}$ ;

$$P = 2 * 100 / 0.04 = 5000 \text{ Н};$$

Расчет контактных напряжений (по формуле Герца-Беляева):

$$\sigma = Z_h * Z_m * \text{sqrt} * \left( \left( \frac{P}{(b * d_1)} \right) * \frac{(u + 1)}{u} \right),$$

Где:

$Z_h$  – коэффициент, учитывающий форму сопряженных поверхностей ( $\approx 1.76$  для эвольвентного зацепления);

$Z_m$  – коэффициент, учитывающий механические свойства материалов (для пары сталь – сталь  $\approx 275 \text{ МПа}^{(1/2)}$ , для нашей пары требуется уточнение);

$b$  – ширина венца (примем  $b = 20 \text{ мм} = 0.02 \text{ м}$ );

$$u = z_2 / z_1 = 60 / 20 = 3,$$

где  $u$  – передаточное число

Предварительная оценка для стали:

$$\sigma \approx 275 * 1.76 * \text{sqrt} \left( \left( \frac{5000}{(0.02 * 0.04)} \right) * \frac{3+1}{3} \right) \approx 275 * 1.76 * \text{sqrt}(6.25 * 1.33) \approx 1395 \text{ МПа}$$

Контактные напряжения высоки. Это обосновывает необходимость износостойкого покрытия, так как алюминиевая основа (AlSi10Mg) не выдержит такой нагрузки. Задача покрытия – принять эти напряжения на себя.

Расчет напряжений изгиба у основания зуба:

$$\sigma_f = (P * K_f) / (b * m * Y_f)$$

Где:

$K_f$  – коэффициент нагрузки (примем = 1.5, для учета динамики);

$Y_f$  – коэффициент формы зуба (для  $z = 20$ ,  $Y_f \approx 3.9$ );

$$\sigma_f = (5000 * 1.5) / (0.02 * 0.002 * 3.9) \approx (7500) / (0.000156) \approx 48 \text{ МПа}$$

Напряжения изгиба не критичны для алюминиевой основы ( $48 \text{ МПа} < 220 \text{ МПа}$ ).

Критичным является контактное давление и износ.

Масса сплошного колеса:

$$V_f = \pi * (R^2 - r^2) * b;$$

$$R = \frac{d^2}{2} = \frac{m * z^2}{2} = \frac{2 * 60}{2} = 60 \text{ мм},$$

где  $r = 20 \text{ мм}$ ;

$$V_f = 3.14 * (0.06^2 - 0.02^2) * 0.02 = 3.14 * (0.0036 - 0.0004) * 0.02 \approx 0.000201 \text{ м}^3;$$

$$m_l = \rho_{Al} * V_f = 2700 \text{ кг/м}^3 * 0.000201 \text{ м}^3 \approx 0.542 \text{ кг}.$$

Оценка массы оптимизированного колеса:

Коэффициент уменьшения объема при топооптимизации может достигать 30–50%. Возьмем 40%.

$$V_{opt} = V_f * (1 - 0.4) = 0.000201 * 0.6 \approx 0.000121 \text{ м}^3$$

$$m_{opt} = 2700 * 0.000121 \approx 0.327 \text{ кг}$$

Сравнение со стальным аналогом:

$$m_f = \rho * V_f = 7800 * 0.000201 \approx 1.568 \text{ кг}$$

Расчетное снижение массы:

$$\Delta m = (1.568 - 0.327) / 1.568 \approx 0.79 = 79\%$$

Заявленные 58% выглядят более консервативно и реалистично, если учесть необходимость оставить более жесткие перемычки.

Вывод – по таким данным можно построить поверхность отклика и определить, что комбинация высокого давления и высокой температуры дает наилучшую адгезию.

Сделаем прогноз ресурса по контактной выносливости, используем для этого упрощенную модель для оценки.

Предел контактной выносливости для материала покрытия:

$$\sigma_{HlimCuAl} \approx 0.4 * \sigma_B = 0.4 * 650 = 260 \text{ МПа}$$

Расчетное контактное напряжение :  $\sigma_H \approx 880 \text{ МПа}$

Вывод:  $\sigma_H > \sigma_{Hlim}$ . Это означает, что будет происходить усталостное выкрашивание (питтинг). Ресурс определяется по кривой Веллера:

$$N = (\sigma_{Hlim} / \sigma_H)^m,$$

где  $m$  - показатель степени (для металлов  $m \approx 6...9$ , возьмем 8).

$$N = (260 / 880)^8 \approx (0.295)^8 \approx 5.6e - 5$$

Это число показывает, во сколько раз ресурс меньше «базового». Если базовый ресурс при напряжении  $\sigma_{Hlim}$  составляет  $N_0 = 10^7$  циклов, то:

$$N_{расч} = 5.6e - 5 * 10^7 = 560 \text{ циклов}$$

Это очень мало и говорит о том, что нагрузка принята очень высокой для демонстрации эффекта.

Реальное колесо будет работать при значительно меньших напряжениях, где разница между гибридным и алюминиевым вариантом будет проявляться в тысячах и миллионах циклов.

Ключевой результат эксперимента: при одном и том же напряжении  $\sigma_H = 600 \text{ МПа}$  алюминиевое колесо разрушится через  $N_{Al} = 50000$  циклов, а гибридное с покрытием  $N_{Hybrid} = 50'000 * 4.2 = 210000$  циклов.

Дальнейшее изучение данного вопроса может быть перспективным с точки зрения изменения параметров при моделировании процесса производства данного изделия.

Полученные результаты позволяют сделать выводы и продолжать развитие технологии для дальнейшей работы в этом направлении.

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

2. Буракова, М. А. Использование аддитивных технологий в машиностроении / М. А. Буракова, Г. С. Нерсесян // Обеспечение надежности, качества и безопасности технологических машин и оборудования : Сборник научных трудов, Ростов-на-Дону, 10 марта 2023 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 14 – 19. – EDN CBAJVI.

3. Аддитивные технологии. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования : ГОСТ Р 57588 – М.: ФГБУ «РСТ2, от 3 декабря 2021 г.

**Секция**

**ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И  
ПРОТОТИПИРОВАНИЕ  
СОЦИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ОБЪЕКТОВ**



УДК 004.9

**Шипилова А.Д., Носков А.Д., Морозов В.В.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: asshipilova@mail.ru

**О СОЗДАНИИ ВИРТУАЛЬНОГО ТУРА ПО СЕЛЬСКИМ ПРОСТОРАМ С  
ВОЗМОЖНОСТЬЮ РЕАЛИЗАЦИИ ОЗДОРОВИТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ  
И ОРГАНИЧЕСКИМ ЗЕМЛЕДЕЛИЕМ**

**Shipilova A.D., Noskov A.D., Morozov V. V.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: asshipilova@mail.ru

**ABOUT CREATING A VIRTUAL TOUR OF RURAL AREAS WITH THE  
POSSIBILITY OF IMPLEMENTING A HEALTH PROGRAM AND ORGANIC  
FARMING**

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы создания виртуального тура по сельским просторам с возможностью реализации оздоровительной программы и органического земледелия. Предложена технология создания тура, включающая в себя: выполнение фотосъемки с использованием сферической камеры Insta 360 Pro; создание тура в программной среде системы 3DVista Virtual Tour. Тур создается на примере села с возможностью реализации оздоровительной программы в районе Тамбова.

*Ключевые слова:* виртуальный тур, сельские просторы с возможностью реализации оздоровительной программы, органическое земледелие, камера Insta 360 Pro, 3DVista Virtual Tour.

*Abstract.* The article discusses the creation of a virtual tour of rural areas with the possibility of implementing a wellness program and organic farming. The article proposes a technology for creating a tour that includes: taking photos using the Insta 360 Pro spherical camera; creating a tour in the 3DVista Virtual Tour software environment. The tour is created using the example of a village with the possibility of implementing a wellness program in the Tambov region.

*Keywords:* virtual tour, rural spaces with the possibility of implementing a wellness program, organic farming, Insta 360 Pro camera, 3DVista Virtual Tour.

Современный ритм жизни заставляет многих искать способы восстановить силы, успокоить ум и наполниться энергией природы. Активный отдых, практика йоги и органического земледелия идеально вписываются в концепцию здорового образа жизни

и гармонии с природой. Это также отличный способ поддержать сельское хозяйство и познакомиться с особенностями местной культуры. Исходя из данной статистики коллектив авторов задумался о создании виртуального тура по сельским просторам с возможностью реализации оздоровительной программы с органическим земледелием в районе Тамбова. За основу виртуального тура было взято село Семеновка, Токаревский муниципальный округ, Тамбовская область. Съёмка панорам происходила при помощи панорамной камеры Insta360 Pro.

Несмотря на волну популярности панорамных камер немногие производители смогли предложить рынку решения, позволяющие снимать в ультра высоком разрешении. Модели камер Insta360 Pro и Titan являются одними из самых востребованных камер 360 градусов в мире, снимающих с максимальным разрешением 8K и 11K (как для 2D, так и для 3D), а также поддерживающих прямые трансляции вплоть до 8K. Камеры работают автономно, поддерживают передачу данных по Ethernet, WiFi, HDMI и применимы для профессиональных нужд.

Создание качественного 3D тура включает несколько этапов:

- Выбор местоположения: Важно выбрать уникальные места, обладающие особенной атмосферой и природной красотой. Местности с возможностями активного отдыха, наличием полей органических культур и удобством для занятий йогой будут особенно привлекательны.

- Сбор материала: Фотографирование и видеосъёмка всех ключевых точек маршрута производится панорамными камерами высокого разрешения. Это позволяет создать эффект полного погружения зрителя в окружающую среду.

- Пост-обработка изображений: Использование специальных программ для обработки снимков и сборки виртуального пространства.

- Интерактивные элементы: Интеграция интерактивных элементов, позволяющих пользователям получать дополнительную информацию о местах посещения, особенностях практик йоги и выращивания органических продуктов.

- Тестирование и оптимизация: Перед публикацией виртуальный тур тестируется на разных устройствах и браузерах, проверяется качество загрузки и плавность просмотра.

Данный виртуальный тур носит ознакомительный характер и предназначен для людей всех возрастов. Он включает в себя как панорамы местности, так и специальные видео инструкции к видам активного досуга, например йоги, в которых можно найти всю необходимую информацию про них: для каких групп мышц предназначено данное упражнение, как правильно выполнять его и чем оно полезно для организма. Основная цель – познакомить жителей нашего города с виртуальным туром по сельским просторам с возможностью реализации оздоровительной программы нашей области и заинтересовать их в активном отдыхе на природе.

Виртуальные экскурсии по сельской местности, совмещающие активные развлечения, практику йоги и знакомство с органическими технологиями земледелия, открывают новые горизонты для тех, кто стремится к здоровому образу жизни и

гармоничному взаимодействию с окружающей средой. Эти проекты способствуют развитию туризма и повышению интереса к культуре сельских регионов, одновременно поддерживая устойчивое развитие аграрного сектора экономики.

На рис. 1(а, б) представлены фрагменты сферических панорам виртуального тура по сельским просторам с возможностью реализации оздоровительной программы и органического земледелия.

Виртуальный тур создается в рамках проектной деятельности, реализуемой в Тамбовском государственном техническом университете командой студентов под руководством наставника профессора кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении» Немтинов В.А.



а)



б)

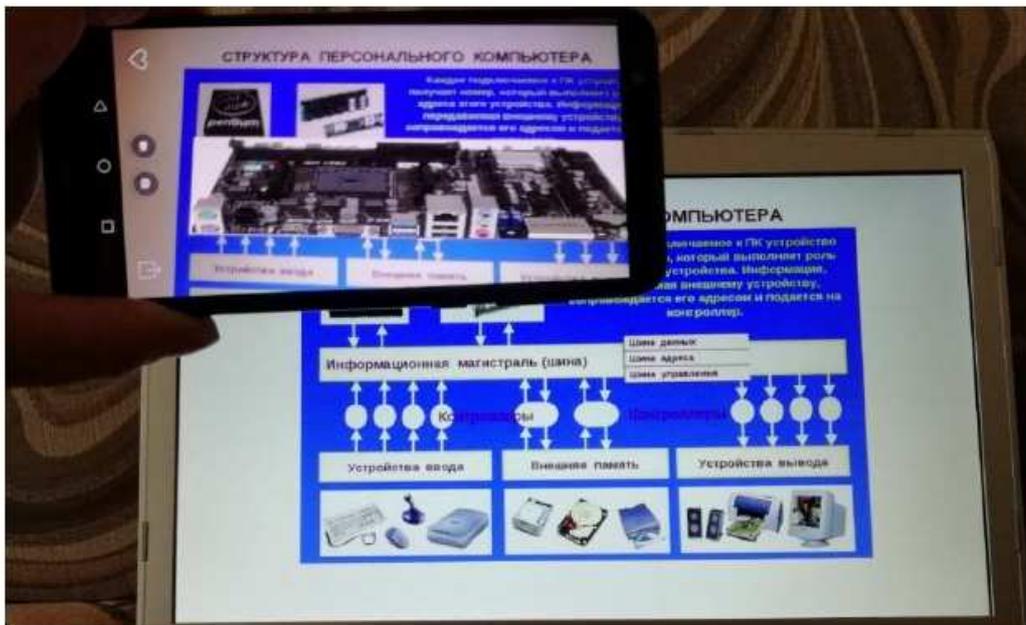
Рис. 1(а, б). Фрагменты сферических программ виртуального тура по сельским просторам с возможностью реализации оздоровительной программы и органического земледелия.

Список использованных источников

1. Повышение уровня профессиональных компетенций с использованием виртуальной образовательной среды / В. А. Немтинов, А. Б. Борисенко, В. В. Морозов, Ю. В. Немтинова // Высшее образование в России. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 104-113. – DOI 10.31992/0869-3617-2021-30-3-104-113
2. Комплексное использование различных программных сред для повышения уровня визуализации и восприятия информации / В. А. Немтинов, А. А. Родина, А. Б. Борисенко [и др.] // Научная визуализация. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 1-10. – DOI 10.26583/sv.15.2.01.
3. Виртуальное погружение во временные периоды пребывания в Тамбовском крае представителей рода Чичериных - известных деятелей дипломатической службы России / В. А. Немтинов, А. А. Горелов, Ю. В. Немтинова, А. Б. Борисенко // Былые годы. – 2020. – № 58(4). – С. 2305-2314. – DOI 10.13187/bg.2020.4.2305.
4. Виртуальный исторический экскурс по памяtnому месту В. И. Вернадского в селе Вернадовка Тамбовской области / В. А. Немтинов, А. Б. Борисенко, А. А. Горелов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2021. – № 3(81). – С. 145-152. – DOI 10.17277/voprosy.2021.03.pp.145-152.
5. Создание виртуальной образовательной среды с использованием технологии квестов / В. А. Немтинов, А. Б. Борисенко, Ю. В. Немтинова [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 529-539. – DOI 10.17277/vestnik.2020.04.pp.529-539.
6. Информационный анализ памятных мест, связанных с пребыванием и деятельностью ученого, биолога-растениевода И.В. Мичурина в Мичуринске / В. А. Немтинов, А. А. Горелов, А. Б. Борисенко [и др.] // Вопросы истории. – 2021. – № 8-2. – С. 163-171. – DOI 10.31166/VoprosyIstorii202108Statyi43.

## Секция

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ, ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ И СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ



УДК 004.89

**Шильцын М.А., Никитников Ю.В., Волков А.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: maks.shilcin@mail.ru

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЦИФРОВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ**

**Shilcin M.A., Nikitnikov Yu.V., Volkov A.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: maks.shilcin@mail.ru

**DEVELOPMENT OF ALGORITHMIC AND SOFTWARE FOR  
RECONSTRUCTION AND MODELING OF THE DIGITAL REPRESENTATION  
OF A USER**

*Аннотация.* В данной статье представлена программная система для захвата движения и реконструкции позы человека, использующая веб-камеру или видеофайл в качестве входных данных. Система построена на игровом движке Unity и применяет нейросетевую модель MediaPipe для оценки позы.

*Ключевые слова:* захват движения, компьютерное зрение, реконструкция позы, 3D-анимация, MediaPipe.

*Abstract.* This article presents a software system for human motion capture and pose reconstruction using a webcam or video file as input. The system is built on the Unity game engine and utilizes the MediaPipe neural network model for pose estimation.

*Keywords:* motion capture, computer vision, pose reconstruction, 3D animation, MediaPipe.

Среди существующих решений для захвата движения можно выделить несколько основных категорий: оптические системы с маркерами и инерционные системы [1].

Оптические системы представляют собой набор маркеров, закреплённых на одежде актёра, и множество высокоскоростных камер. Ключевыми недостатками этих систем являются не только высокая стоимость, но и необходимость точной калибровки камер и специально подготовленного помещения (студии), что значительно увеличивает бюджет.

Принцип работы инерционных систем заключается в использовании инерционных датчиков (IMU), закреплённых на теле актёра. Основные преимущества данного типа систем захвата движения является их мобильность (не привязаны к помещению) и независимость от условий освещения. Из недостатков стоит выделить факт накопления

ошибки со временем, необходимость регулярных калибровок и потерю точности захвата движения при быстрых движениях.

Таким образом, традиционные системы захвата движения требуют дорогостоящего оборудования и контролируемых условий, что ограничивает их доступность. Учитывая большое количество проектов с ограниченным бюджетом (особенно на рынке игр), существует устойчивая потребность в низкобюджетных альтернативных решениях.

Учитывая текущий уровень развития нейронных сетей, рационально использовать их для создания доступных систем захвата движения. Оптимальным решением является применение моделей компьютерного зрения, которые определяют координаты ключевых точек тела человека на видеокадре. К таким моделям относятся, например, MediaPipe и YOLO.

В данной работе используется нейросеть MediaPipe, поскольку, в отличие от YOLO, он предоставляет не только 2D-координаты, но и оценку глубины (Z-координату) для ключевых точек, что критически важно для реконструкции трехмерной позы из видеопотока с одной камеры (Рисунок 1).

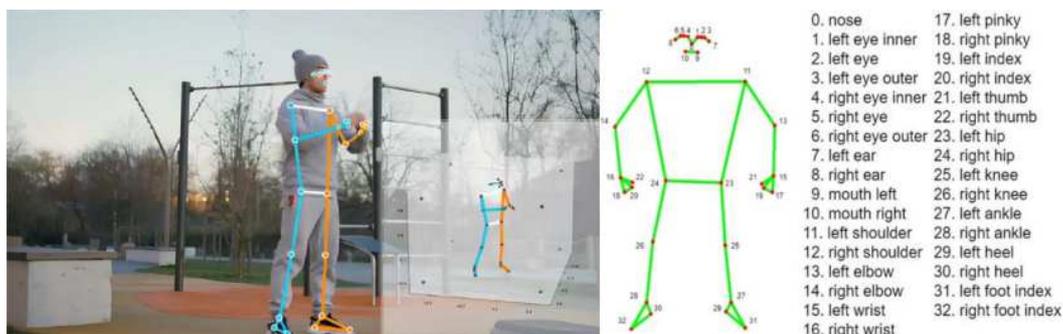


Рис. 1. Визуализация выходных данных нейросети Mediapipe

Рассмотрим подробнее принципы работы разработанного приложения. Входной видеопоток обрабатывается моделями MediaPipe Pose и MediaPipe Hands, которые выделяют ключевые точки скелета человека и кистей рук. Полученные координаты преобразуются в 3D-пространство Unity и сопоставляются с костной структурой (Rig) 3D-модели-гуманоида.

Алгоритм обработки каждого кадра выглядит следующим образом:

1. Из входного видеопотока (веб-камера или видеофайл) извлекается кадр;
2. Кадр отправляется в нейросеть MediaPipe. В ответ приходит массив точек тела в нормализованном формате  $\{x, y, z, v\}$ , где  $v$  – уверенность нейросети в корректности распознавания данной точки;
3. Полученный массив пропускается через алгоритм фильтрации для минимизации шумов и дрожания точек;
4. Отфильтрованный массив нормализованных координат преобразуется в массив 3D-векторов, соответствующие направлениям костей скелета 3D-модели [3];
5. На основе векторов рассчитываются кватернионы вращения для соответствующих костей скелета гуманоидного 3D-персонажа;

6. Полученные кватернионы применяются к костям 3D-модели для повторения позы человека на кадре (Рисунок 2).



Рис. 2. Пример обработки кадра

В результате была разработана система с низкими требованиями к производительности компьютера и используемой камере. Основным преимуществом является отсутствие необходимости в специализированном оборудовании.

Однако система обладает и существенными недостатками по сравнению с профессиональными решениями: зависимость от условий освещения, снижение точности при быстрых движениях, невысокий общий уровень точности, проблемы при перекрытии конечностей другими частями тела на кадре.

Перспективным направлением для улучшения качества работы является использование нескольких камер и алгоритмов взвешенной триангуляции для построения более точной 3D-позы. Это позволит значительно повысить точность распознавания и решить проблему перекрытия конечностей [2].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка иммерсивной системы взаимодействия с виртуальной реальностью для профессиональной подготовки на основе всенаправленной платформы» (124102100628-3).*

#### Список использованных источников

1. Hicks H. N., Chen H., Harper S. A. Sensor Fusion for enhancing motion capture: Integrating optical and inertial motion capture systems //Sensors. – 2025. – Т. 25. – №. 15. – С. 4680.
2. Cheng X. et al. Reliability and validity of current computer vision based motion capture systems in gait analysis: A systematic review //Gait & Posture. – 2025. – Т. 120. – С. 150-160.
3. Development of a gesture-based system of interaction with the interface of adaptive information systems / K. Patutin, E. Surkova, O. Sokolinskaya [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2388, No. 1. – P. 012030. – DOI 10.1088/1742-6596/2388/1/012030. – EDN BWDDII.

УДК 004.89

**Никитников Ю.В., Круглов В.С., Обухов А.Д.**  
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: yury.nikitnikov@yandex.ru

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИПЛАТФОРМЕННОЙ СИСТЕМЫ  
КЛАССИФИКАЦИИ УПРАЖНЕНИЙ ДЛЯ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ  
РЕАБИЛИТАЦИИ**

**Nikitnikov Yu.V., Kruglov V.S., Obukhov A.D.**  
Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: yury.nikitnikov@yandex.ru

**DEVELOPMENT OF A MULTI-PLATFORM CLASSIFICATION SYSTEM FOR  
EXERCISES FOR MUSCULOSKELETAL REHABILITATION**

*Аннотация.* В данной статье представлена разработка мультиплатформенной системы для классификации и анализа реабилитационных упражнений опорно-двигательного аппарата. Рассмотрены основные средства захвата движения, методы различных алгоритмов машинного обучения при классификации упражнений и технологии оценки их точности выполнения.

*Ключевые слова:* захват движения, компьютерное зрение, машинное обучение, мультиплатформенная система.

*Abstract.* This article presents the development of a multi-platform system for classifying and analyzing musculoskeletal rehabilitation exercises. It examines the main motion capture tools, various machine learning algorithms for exercise classification, and technologies for assessing the accuracy of their execution.

*Keywords:* motion capture, computer vision, machine learning, multi-platform system.

Современная реабилитация опорно-двигательного аппарата (ОДА) все активнее использует цифровые технологии для повышения эффективности и доступности лечения. Одной из ключевых проблем, особенно в условиях домашней реабилитации, является отсутствие постоянного контроля со стороны инструктора, что зачастую приводит к неправильному выполнению упражнений и, как следствие, снижению их эффективности или даже риску получения травмы.

Основываясь на данной проблеме, было предложено разработать кроссплатформенное приложение, которое способно выполнять захват движения пользователя в реальном времени, классифицировать упражнения и высчитывать точность выполнения упражнений. Система предоставляет обратную связь, позволяя

пользователю самостоятельно корректировать технику выполнения без постоянного присутствия инструктора.

При разработке мультиплатформенной системы для классификации и оценки упражнений была выбрана технология Kotlin Multiplatform Mobile (КММ). Данный фреймворк, позволяющий разрабатывать кроссплатформенные мобильные приложения, используя единую кодовую базу для бизнес-логики и нативный интерфейс для каждой платформы.

Для решения задачи распознавания движений пользователя применяются различные подходы машинного обучения, включая:

1. MediaPipe – кроссплатформенный фреймворк с готовыми ML-решениями
2. MMPose – открытая платформа для полного анализа
3. YOLO-Pose – единая модель для детекции людей и их позы

В качестве основы для кроссплатформенной системы классификации упражнений была выбрана предобученная нейросетевая модель MediaPipe [1]. Данное решение обеспечивает аппаратную оптимизацию и стабильную работу на всех целевых платформах, включая Android, iOS, десктопные системы и веб-браузеры (Рис 1.).



Рис. 1. Пример использования MediaPipe на мобильных системах

На основе полученных данных с помощью компьютерного зрения требуется также выполнять классификацию выполняемых упражнений. Для этого требуется выбрать алгоритм машинного обучения и провести анализ на точность их работы, выбрав наиболее эффективный.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов классификации упражнений

Страница	Верхнее	Нижнее
Decision Tree (DT)	Традиционный ML	94.12% (S5, все точки)
K-Nearest Neighbors (KNN)	Традиционный ML	100% (S5, все точки)
Random Forest (RF)	Традиционный ML	100% (S5, все точки)
Simple Neural Network (NN)	Нейронная сеть	100% (S5, все точки)
LSTM	Рекуррентная сеть	29.41% (S5, все точки)
CNN	Сверточная сеть	88.24% (S5, все точки)
CNN + Transformer	Гибридная сеть	100% (S5, все точки)

По результатам сравнительного анализа наилучшую точность классификации (100%) показали модели K-Nearest Neighbors, Random Forest, простая нейронная сеть и гибридная архитектура Transformer. Традиционные алгоритмы (Random Forest, KNN) продемонстрировали оптимальное сочетание высокой точности и простоты реализации, что делает их предпочтительным выбором для реабилитационных систем [2].

На последнем этапе анализа упражнений проводится оценка точности выполнения, который состоит из трех этапов.

1. Регистрация и предобработка – фиксация траекторий ключевых точек с последующей фильтрацией и нормализацией данных.

2. Расчет метрик – определение пространственно-временных характеристик движения: крайние положения точек, пройденное расстояние, скорость и время выполнения.

3. Сравнение с эталоном – оценка точности через отклонение траектории (MSE), евклидово расстояние между точками и разницу временных параметров.

Таким образом, разработанная мультиплатформенная система на основе Kotlin Multiplatform и алгоритмов Random Forest/KNN демонстрирует высокую эффективность для классификации и оценки качества реабилитационных упражнений в условиях домашнего использования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№124032800018–5).*

#### Список использованных источников

1. Архитектура, модели и алгоритмы обработки информации мобильной тренажерной системы для опорно-двигательной реабилитации / А. Д. Обухов, А. О. Назарова, А. А. Волков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25, № 8. – С. 415-424

2. Obukhov, A., Volkov, A., Nikitnikov, Y. Development of a Mobile Application for Musculoskeletal Rehabilitation Based on Computer Vision and Inertial Navigation Technologies //Technologies. – 2024, – Т. 12, С. 243.

УДК 004.89

**Круглов В.С., Шильцын М.А., Обухов А.Д.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: fuwii.workspace@gmail.com

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ С СИСТЕМОЙ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ**

**Kruglov V.S., Shilcin M.A., Obukhov A.D.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: fuwii.workspace@gmail.com

## **INTERACTION OF THE BIOLOGICAL FEEDBACK SYSTEM WITH THE MUSCULOSKELETAL REHABILITATION SYSTEM**

*Аннотация.* В данной статье представлено математическое обеспечение системы биологической обратной связи. Рассмотрены основные компоненты системы и их взаимодействие с системой опорно-двигательной реабилитации.

*Ключевые слова:* биологическая обратная связь, опорно-двигательная реабилитация, виртуальная реальность.

*Abstract.* This article presents the mathematical foundation of a biofeedback system. The main components of the system and their interaction with the musculoskeletal rehabilitation system are discussed.

*Keywords:* biological feedback, musculoskeletal rehabilitation, virtual reality.

Интеграция систем биологической обратной связи (БОС) в технологии опорно-двигательной реабилитации (ОДР) представляет собой перспективное направление развития современной медицинской инженерии. Использование БОС обеспечивает непрерывный сбор, обработку и анализ физиологических параметров пациента в режиме реального времени, что позволяет осуществлять объективный мониторинг состояния организма и оперативный контроль эффективности проводимых реабилитационных мероприятий. В совокупности с системой виртуальной подобное решение позволит создавать интерактивные упражнения, игровые сценарий подстраивающиеся под пользователя для улучшения мотивации [1].

Применение сигналов обратной связи для изменения параметров виртуальной среды или системы ОДР. Введем следующее допущение. Так как виртуальная сцена работает в дискретном времени (кадрах), то пусть задано множество кадров  $t \in T$ , соответствующих дискретным моментам времени. Аналогично можно принять, что вся система ОДР работает в дискретном времени, на каждом из моментов времени

функционируя по заданному набору параметров. Обозначим множество параметров системы ОДР, включающее в том числе и параметры виртуальной сцены, как  $W$ . Тогда можно сказать, что задано множество состояний системы ОДР  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , где каждому состоянию  $y$  соответствует вектор  $w_y$ , а также функция переходов  $\phi_5: Y \times L \rightarrow Y$ . Следовательно, на каждом кадре  $t$  задан вектор параметров:  $w_y(t)$  и формируется сигнал  $l(t)$ . Переход состояния тогда осуществляется следующим образом:

$$w_y(t+1) = \phi_5[w_y(t), l(t)] \quad (1)$$

Или, если задать некоторую функцию  $G_y$  изменения параметров:

$$w_y(t+1) = w_y(t) + \Delta t \cdot G_y[w_y(t), l(t)] \quad (2)$$

где  $\Delta t$  – временной шаг между кадрами.

$G_y$  – функция изменения параметров системы ОДР.

Функция  $G_y$  может быть представлена как векторная функция, где каждый элемент определяет изменение соответствующего параметра:

$$G_y[w_y(t), l(t)] = \begin{bmatrix} g_1(w_y(t), l(t)) \\ g_2(w_y(t), l(t)) \\ \vdots \\ g_n(w_y(t), l(t)) \end{bmatrix} \quad (3)$$

где  $g_i$  – функция изменения  $i$ -го параметра.

Примерами функций изменения параметров может быть изменение параметров виртуальной сцены, например:

- позиции виртуального объекта  $g_{\text{позиция}} = v_{\text{движение}}(l(t))$ , где  $v_{\text{движение}}(l(t))$  – скорость движения, зависящая от  $l(t)$ .

- управления анимацией:  $g_{\text{кадр}} = f_{\text{анимация}}(l(t))$ , где  $f_{\text{анимация}}(l(t))$  – функция, определяющая изменение кадра анимации.

В качестве параметров могут также выступать параметры аппаратного обеспечения ОДР, например скорость дорожки, высота подъема страховочного механизма и т. д.

Изменения параметров  $w_y$  отображаются или влияют на пациента посредством некоторого множества устройств вывода  $O$ , предоставляющих обратную связь пациенту. Элементы  $o \in O$  включают VR-шлемы, а также другие средства воздействия. Эти воздействия посредством устройств вывода  $o$  генерируют некоторые стимулы  $i \in I$ .

Под стимулом  $i(t)$  будем понимать информацию или некоторое физическое воздействие, предоставляемая пациенту через устройства вывода, которая воздействует на его сенсорные системы (зрение, слух, тактильные ощущения и т. д.). Стимулы являются посредником между состоянием системы ОДР и реакцией пациента. Среди стимулов выделим следующие типы:

Визуальные стимулы: изменения в визуальном отображении (движение объектов, изменение цвета, яркости, формы).

Аудиальные стимулы: звуковые сигналы (музыка, звуковые эффекты, речевые инструкции).

Проприоцептивные стимулы: изменение положения тела в пространстве (при использовании беговых платформ или манипуляторов).

Тогда пусть задана некоторая функция вывода обратной связи  $\phi_6: W \times O \rightarrow I$ , тогда некоторый вектор стимулов  $i(t)$  определяется по формуле:

$$i(t) = H_0[w_y(t)] \quad (4)$$

где  $i(t)$  – вектор стимулов, предоставляемых пациенту в момент времени  $t$ .

$w_y(t)$  – вектор параметров состояния системы ОДР в момент времени  $t$ .

$H_0[\cdot]$  – функция отображения состояния системы ОДР в стимулы.

Вектор стимулов может включать множество стимулов различных типов:  $i(t) = [i_1(t), i_2(t), \dots, i_m(t)]$

Функция  $H_0$  может быть представлена как матрица или набор функций, связывающих параметры системы с соответствующими стимулами:

$$i(t) = H_0[t_v(t)] = \begin{bmatrix} h_1(w_y(t)) \\ h_2(w_y(t)) \\ \vdots \\ h_m(w_y(t)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

где  $h_j(w_y(t))$  – функция формирования  $j$ -го стимула на основе параметров текущего состояния системы ОДР.

На следующем этапе необходимо формализовать процесс реакции пациента на стимулы  $\phi_7: I \times P \rightarrow P'$ , где  $P'$  – новое состояние пациента. Этому новому состоянию соответствует это вектор  $x_p(t)$ , описывающий физические и психологические параметры пациента в момент времени  $t$ . Как было отмечено ранее, в этот вектор могут входить различные параметры человека, включая: положение и движение конечностей, мышечная (ЭМГ) и мозговая (ЭЭГ) активность, сердечный ритм (ЭКГ), показатели дыхания и т. д.

Влияние конкретных стимулов на состояние пациента в большинстве случаев затруднительно спрогнозировать и аналитически рассчитать. Можно предположить, что изменение отдельных характеристик пациента зависит от некоторой аппроксимирующей статистические данные функции или модели (включая модель машинного обучения). Однако для определения такой функции необходимо осуществить обработку данных с пациента, собранных в процессе воздействия различных стимулов с фиксацией его реакции, что является трудоемкой задачей, в которой потребуется учесть косвенное влияние различных факторов помимо непосредственно стимулов.

В общем такую модель изменения состояния пациента можно представить как:

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = F_p[x_p(t), i(t)] \quad (6)$$

где  $F_p[\cdot]$  – функция, описывающая динамику изменения состояния пациента под воздействием стимулов  $i(t)$ .

В том числе функция  $F_p[\cdot]$  может быть представлена как система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_p(t)}{dt} = \begin{bmatrix} f_{p,1}(x_p(t), i(t)) \\ f_{p,2}(x_p(t), i(t)) \\ \vdots \\ f_{p,q}(x_p(t), i(t)) \end{bmatrix} \quad (7)$$

где  $f_{p,j}(x_p(t), i(t))$  – функция изменения  $j$ -го параметра состояния пациента.

Таким образом, стимулы  $i(t)$  являются ключевым элементом, связывающим состояние ОДР, полученное на основе БОС, и дальнейшие характеристики пациента.

Объединяя все рассмотренные ранее компоненты и функции, получаем замкнутую систему, где выход одного компонента является входом для другого, образуя контур биологической обратной связи:

$$p \xrightarrow{\phi_1} b \xrightarrow{\phi_2} r \xrightarrow{\phi_3} e \xrightarrow{\phi_4} l \xrightarrow{\phi_5} w \xrightarrow{\phi_6} i \xrightarrow{\phi_7} p' \quad (8)$$

где  $b$  – биологический сигнал.

$r$  – множество «сырых» данных с датчиков системы для ОДР [2].

$e$  – множество обработанных (отфильтрованных) данных

Здесь  $p'$  передается на вход системы, и цикл повторяется.

Представленное математическое обеспечение системы ОДР с биологической обратной связью на основе теории множеств позволяет формально описать основные компоненты системы и их взаимодействие.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№124032800018–5).*

#### Список использованных источников

1. Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation / A. D. Obukhov, A. Volkov, A. N. Pchelintsev [et al.] // Sensors. - 2023. - Vol. 23, No. 19. - P. 8058.
2. Обухов, А. Д. Структурная модель системы опорно - двигательной реабилитации с биологической обратной связью / А. Д. Обухов, А. А. Волков, В. С. Круглов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы X Международной научно-практической конференции, Тамбов, 21–22.

УДК 004.021

**Свешников А. Ю.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: saprwebtech@yandex.ru

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФУНКЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ  
СИСТЕМЫ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ  
ТРАЕКТОРИИ ОБУЧЕНИЯ**

Sveshnikov A. Yu.

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: saprwebtech@yandex.ru

**DEVELOPMENT OF A MODEL OF MANAGEMENT FUNCTIONS OF AN  
INFORMATION SYSTEM OF RECOMMENDATIONS FOR CHOOSING AN  
INDIVIDUAL LEARNING PATH**

*Аннотация.* Статья посвящена вопросу разработки функций управления для системы поддержки принятия решений по выбору индивидуальной образовательной траектории. Детально рассмотрены основные функции теории управления, являющиеся фундаментом разработки программного продукта. В исследовании применяются методы системного анализа и функционального деления. Рассмотрены архитектурные решения.

*Ключевые слова:* индивидуальная траектория обучения, системный анализ, теория управления, технологический стек, формализованная модель, функции управления.

*Abstract.* The article is devoted to the issue of developing management functions for a decision support system for choosing an individual educational trajectory. The main functions of management theory, which are the foundation of software product development, are considered in detail. The research uses methods of system analysis and functional division. Architectural solutions are considered.

*Keywords:* individual learning trajectory, system analysis, management theory, technological stack, formalized model, management functions.

**Введение**

В настоящее время создание информационных систем, способных выстраивать индивидуальные образовательные траектории с учетом индивидуальных особенностей кандидата и рынка труда является актуальной задачей.

Целью работы является разработка информационной системы, позволяющей выбрать индивидуальную траекторию обучения. Необходимо отметить, что данная система должна адаптироваться в соответствии с меняющимися условиями окружающей среды. Такая система позволит осуществить первичную диагностику

потенциального кандидата не только на этапе построения ИОТ, но и в процессе обучения для уточнения параметров. К объектам, рассматриваемым в рамках данного исследования, относятся кандидаты (абитуриенты, выпускники и сотрудники). Атрибуты кандидата являются основной его характеристикой.

### **Функции управления информационной системы**

Разрабатываемая система состоит из нескольких подсистем, которые взаимосвязаны между собой. Таким образом, данную систему можно охарактеризовать как сложную. К подсистемам относятся: подсистема управления данными, анализа, а также формирования рекомендаций.

Постоянное взаимодействие с внешней средой делает систему открытой. В роли представителей внешней среды выступают:

- образовательные учреждения, которые содержат направления подготовки, позволяющие повысить уровень компетенций;
- работодатели – представители рынка труда;
- кандидаты (абитуриенты, выпускники, сотрудники) с определенным набором характеристик.

Следует отметить, что данная система полностью соответствует аксиомам теории управления [1, 2]. В любой момент времени  $\tau$  можно получить информацию об эргатическом элементе: уровень компетенций, соответствия интересов и предпочтений требуемому уровню представителей внешней среды. Данное высказывание подтверждает, что система имеет наблюдаемость, что является фундаментом для успешного функционирования программного продукта. Формула (1) отражает формализованную запись данного принципа:

$$y(\tau) = g[\tau, x(\tau), z(\tau)] \quad (1)$$

где:

- $\tau$  – момент времени;
- $x(\tau)$  – оказываемое воздействие на кандидата;
- $z(\tau)$  – внутреннее состояние кандидата;
- $y(\tau)$  – мера реализации выходного процесса.

Для кандидата на трудоустройство в качестве оказываемого воздействия выступают программы, которые были освоены в процессе обучения. Компетенции определяют внутреннее состояние кандидата, а в качестве меры реализации выступают результаты собеседования и имеющиеся достижения.

Следующий принцип данной системы – это управляемость. Данный принцип заключается в обеспечении возможности перехода из состояния  $Q_0$  в состояние  $Q_1$ . А наличие сформулированной цели является третьим принципом теории управления. Цель заключается в нахождении такой траектории обучения, которая позволит максимизировать уровень компетенций кандидата под требования работодателя. Аксиома свободы выбора подтверждается наличием имеющихся в работе альтернатив, которые представлены программами обучения (дисциплины, курсы и семинары).

Степень соответствия компетенций требованиям работодателя является критерием эффективности в данной работе. Это подтверждает следующее высказывание теории управления: «Наличие критерия эффективности управления. Обобщенным критерием эффективности управления считается степень достижения цели функционирования системы» [3].

Следует уделить внимание основным функциям управления. Рассмотрим каждую из них.

1) Функция сбора данных  $f_d$  необходима для получения информации о текущем состоянии исследуемого кандидата. Данная информация содержит в себе сведения об интересах, личностных качествах, а также загруженные файлы, подтверждающие достижения. Собираемая информация от представителей внешнего воздействия позволяет формировать правила и условия, влияющие на выбор индивидуальной траектории обучения. Формализованную запись можно представить следующим видом:

$$f_d = \{ \langle S \rangle, \langle I \rangle, \langle D \rangle, \langle P \rangle, \langle LK \rangle \}, \quad (2)$$

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (3)$$

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\} \quad (4)$$

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\} \quad (5)$$

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_q\} \quad (6)$$

$$LK = \{lk_1, lk_2, \dots, lk_r\} \quad (7)$$

где:

$S$  – вектор информации о текущих навыках и знаниях;

$I$  – вектор информации об интересах;

$D$  – вектор информации о достижениях;

$P$  – вектор информации о предпочтениях;

$LK$  – вектор личностных качеств.

2) Функция учета  $f_y$  позволяет хранить информацию о кандидатах, образовательных организациях, а также о рынке труда.

3) Функция анализа  $f_a$  позволяет осуществлять анализ данных, которые были получены этапе сбора данных, рассчитывать соответствие требованиям образовательным программам, а также условиям рынка труда. Для анализа цифровой информации используются методы интеллектуальной обработки файловых данных. Данный анализ позволяет получить сведения об имеющихся компетенциях для их дальнейшего сопоставления с вектором требуемых компетенций.

4) Функция прогнозирования  $f_{pr}$  обеспечивает суждения о развитии компетенций при выборе возможных альтернатив, представленных направлениями подготовки.

5) Функция планирования  $f_{pl}$  позволяет формировать план действий по развитию компетенций эргатического элемента для достижения требуемого результата путем выбора траектории обучения.

6) Функция контроля  $f_k$  позволяет проверить соответствие выбранной траектории желаемому результату. Формализованная запись данной функции представлена формулой (8). Результат данного контроля позволит проанализировать текущий уровень компетенций и в случае необходимости динамически корректировать в процессе его обучения новую траекторию достижения поставленной цели.

$$f_k = \bar{X} - \bar{D}, \quad (8)$$

где:

$\bar{X}$  – компетенции кандидата на текущий момент;

$\bar{D}$  – желаемые компетенции.

Хорошо организованный механизм взаимодействия между подсистемами программного продукта позволит реализовать описанные выше функции. Данные, собранные при помощи функции  $f_d$  являются входами для функции  $f_a$ . При помощи алгоритмов сопоставления происходит вычисление степени соответствия текущего уровня компетенций кандидата требованиям образовательных программ, а также рынку труда. В результате данного анализа будет получена матрица отклонений, которая позволит функции прогнозирования  $f_p$  построить модель развития кандидата для удовлетворения его потребностей. Благодаря данной функции можно построить оптимальный план, который позволит минимизировать разрыв между желаемыми компетенциями и текущими. Следует отметить, что на этапе обучения по индивидуальной траектории необходимо контролировать данный процесс. Этого можно достигнуть с помощью функции  $f_k$ . Данная функция при выявлении отклонения компетенций от желаемого результата в виду изменяющихся требований рынка труда позволит запустить механизм коррекции, вернувшись на первоначальный этап анализа и планирования.

### **Архитектурные решения**

Использование многоуровневой архитектуры при реализации программного продукта позволит сделать систему масштабируемой, надежной, а также безопасной. В архитектуре данной системы можно выделить следующие виды уровней:

– Уровень управления данными DL (Data Logic). Данный уровень включает в себя базу данных, хранящую структурированные данные не только о кандидатах, но и об образовательных программах и работодателях. На этом уровне осуществляется взаимодействие с базой данных, реализуются алгоритмы для обработки данных, а также формируется логика SQL-запросов для выборки данных.

– Уровень представления PL (Presentation Logic). На данном уровне осуществляется взаимодействие между пользователем и информационной системой.

Это взаимодействие достигается с помощью пользовательского интерфейса, который должен быть интуитивно понятным. Целью данного уровня является получение входных данных для дальнейшего системного анализа. Для создания веб-приложения принято решение использовать фреймворк Flask для языка Python.

– Уровень бизнес-логики BL (Business or Application Logic) – ядро системы, реализованное на языке программирования высокого уровня (в данном случае на языке Python). Целью данного уровня является непосредственно обработка данных и принятия решений. На данном уровне определяются алгоритмы сбора и анализа данных, алгоритмы прогнозирования и формирования рекомендаций.

– Уровень операций над данными DS (Data Services). Этот уровень представлен действиями над данными, выполнением запросов, полученных на уровне DL, чтением имеющейся информации и записью новых данных, а также управлением транзакциями.

### **Заключение**

Проведенный анализ показывает, что разрабатываемая система является сложной, динамической и открытой, находящейся в постоянном взаимодействии как с кандидатами, так и с элементами внешней среды. Данная система в полном объеме соответствует аксиомам теории управления: наблюдаемости, управляемости и свободы выбора. Успешная реализация программного продукта позволит повысить эффективность процесса обучения и трудоустройства за счет обеспечения персонализированного подхода развития и повышения уровня компетенций. Построена содержательная и формализованная модель системы, а также определены основные ее атрибуты. Разработанная модель является фундаментом для создания и использования на практике программного продукта, обеспечивающего индивидуальный подход к процессу планирования обучения, позволяя максимизировать компетенции в соответствии с запросами работодателей.

### **Список использованной литературы**

1. Алексеенко, В. Б. Основы системного анализа: учебное пособие / В. Б. Алексеенко, В. А. Красавина. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2010. – 172 с.
2. Дязитдинова, А. Р. Общая теория систем и системный анализ: учебное пособие / А. Р. Дязитдинова, И. Б. Кордонская. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2017. – 125 с.
3. Сычев, А.В. Теория и практика разработки современных клиентских веб-приложений: курс лекций / А.В. Сычев – Москва: Интуит НОУ, 2016. – 483 с.
4. Карамзина, А. Г. Интеллектуальный анализ данных для подбора персонала по профессиональным компетенциям на должность системного аналитика / А. Г. Карамзина // Современные наукоемкие технологии. – 2020. – № 12-1. – С. 56-62.
5. Маренко, В.А. Структуризация информации при решении задачи управления образовательным процессом / В.А. Маренко, О.Н. Лучко, О.С. Лупенцов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 3 (39).

УДК 004.9

**Майоров Н.И., Волков А.А., Обухов А.Д.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: obuhov.art@gmail.com

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМИТАЦИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ОПОРНО-  
ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ**

**Mayorov N.I., Volkov A.A., Obukhov A.D.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: obuhov.art@gmail.com

**DEVELOPMENT OF ALGORITHMIC SUPPORT FOR THE INTERACTION OF  
SIMULATION COMPONENTS OF MUSCULOSKELETAL REHABILITATION**

*Аннотация.* Рассматривается алгоритм взаимодействия компонентов системы опорно-двигательной реабилитации, отражающий жизненный цикл функционирования системы. Представлена формализация алгоритма и основные его этапы.

*Ключевые слова:* опорно-двигательная реабилитация, имитационные компоненты, алгоритм взаимодействия, IDEF0.

*Abstract.* The algorithm of interaction of the components of the musculoskeletal rehabilitation system, reflecting the life cycle of the system functioning, is considered. The formalization of the algorithm and its main stages are presented.

*Keywords:* musculoskeletal rehabilitation, simulation components, interaction algorithm, IDEF0.

Система опорно-двигательной реабилитации (ОДР) необходимо рассматривать как распределенный программно-аппаратный комплекс, объединяющий несколько специализированных компонентов: подсистему визуализации на основе виртуальной реальности (VR), подсистему сбора и цифровой обработки физиологических сигналов (включая ЭЭГ, ЭМГ, ЭКГ и т.п.), подсистему управления движением и имитационным оборудованием, а также интерфейс оператора и центральный сервер управления. Взаимодействие компонентов построено по принципам микросервисной архитектуры: каждый компонент функционирует как независимый сервис с четко определенными входами и выходами, а обмен данными осуществляется через сеть по унифицированным протоколам.

Рассмотрим формализацию алгоритма взаимодействия компонентов системы ОДР. Он охватывает весь жизненный цикл работы системы: от запуска и подготовки компонентов до завершения упражнения, анализа результатов и штатного выключения.

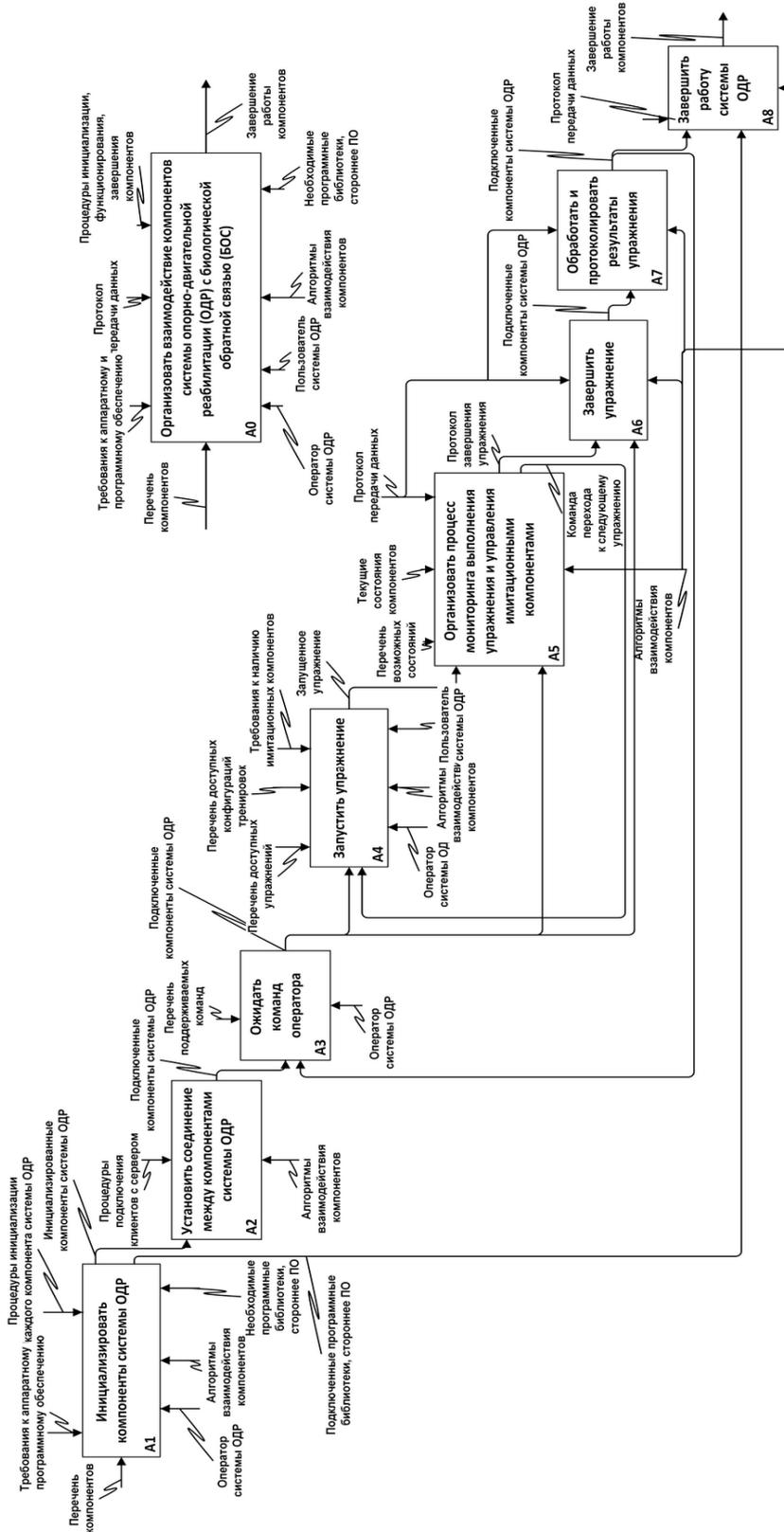


Рис. 1. Алгоритм взаимодействия компонентов системы ОДР

Этап А1. Инициализация подсистем. На этапе А1 все компоненты системы опорно-двигательной реабилитации запускаются и переходят в исходное рабочее состояние. Каждый компонент загружает свою конфигурацию, включает журналирование

событий, выполняет самопроверку и калибровку датчиков. Центральный сервер активирует управление безопасностью и подготовку соединений, подсистема визуализации проверяет готовность VR-сцены и устройств отображения, оборудование для реабилитации переводится в безопасный стартовый режим. Итогом этапа является готовность всех компонентов к объединению в единую систему.

Этап А2. Установление соединений и регистрация компонентов. На этапе А2 отдельные компоненты объединяются в функционирующую систему за счёт установления устойчивых сетевых соединений с центральным сервером. Каждый компонент автоматически обнаруживает сервер, получает от него сетевые параметры и устанавливает постоянный канал связи. После подключения компонент регистрируется: сервер фиксирует его тип, состояние и версию протокола обмена данными. В результате формируется управляемая структура «центральный сервер – подключенные компоненты», в которой сервер получает возможность передавать команды и собирать данные от аппаратных и программных подсистем в реальном времени.

Этап А3. Готовность и ожидание команды оператора. На этапе А3 система полностью собрана технически, но еще не запущена в тренировочный режим. Все компоненты находятся на связи с сервером и сообщают о своем состоянии, а оператор через интерфейс управления видит, какие устройства и средства визуализации готовы к работе, есть ли неисправности или риски. Отсюда возможен выбор оператора – начать новое упражнение, перейти к анализу ранее завершённых сеансов или завершить работу платформы.

Этап А4. Запуск упражнения и активация оборудования. На этапе А4 оператор выбирает конкретное упражнение, задает параметры сеанса, после чего отправляет команду запуска. Центральный сервер проверяет, что все необходимые компоненты доступны и находятся в исправном состоянии. Затем сервер активирует их: подсистема визуализации загружает виртуальную сцену, подсистема движения включает отслеживание координат пациента, оборудование переводится в рабочий режим. Перед стартом проводится калибровка положения пользователя, чтобы виртуальное тело и реальное положение совпадали. После подтверждения готовности всех компонентов упражнение официально запускается.

Этап А5. Выполнение упражнения и мониторинг состояния. Этап А5 – это активная фаза тренировки, в которой пользователь взаимодействует с виртуальной сценой и реабилитационным оборудованием, а система непрерывно следит за безопасностью и эффективностью. Визуализация воспроизводит сценарий упражнения, подсистема движения отслеживает положение и траекторию движений пациента, оборудование выполняет заданные режимы работы. Параллельно подсистема регистрации физиологических сигналов фиксирует нагрузку на организм. Центральный сервер анализирует эти данные в реальном времени, может снижать нагрузку или принудительно остановить упражнение при превышении безопасных порогов. Все ключевые события и измерения записываются в протокол сессии.

Этап А6. Завершение упражнения. Этап А6 начинается либо после штатного окончания упражнения, либо по команде оператора, либо при срабатывании аварийной остановки. Центральный сервер рассылает всем активным компонентам команду завершить текущую деятельность: визуализация выходит из тренировочной сцены, оборудование останавливается и переводится в безопасный режим, каналы прямого обмена данными между компонентами закрываются. Компоненты снимают статус «занято», чтобы их можно было использовать повторно. После этого система возвращается в состояние готовности.

Этап А7. Анализ результатов сессии. На этапе А7 оператор получает доступ к данным выполненного упражнения: временные ряды движения, показатели устойчивости, точность движений, физиологические сигналы, моменты перегрузок, ошибки выполнения и т.д. Центральный сервер передает интерфейсу оператора полную запись сессии, включая события сценария и измеренные показатели. Эти данные могут быть показаны в виде графиков, индикаторов прогресса и сравнений с предыдущими тренировками. Такой анализ позволяет оценить динамику состояния пациента, скорректировать программу следующего занятия, зафиксировать объективные результаты реабилитации для медицинского протокола.

Этап А8. Штатное завершение работы системы. Этап А8 – это корректное выключение всей платформы. Центральный сервер передает всем подключённым компонентам команду завершить работу и закрыть соединения. Каждый компонент аккуратно останавливает вспомогательное программное обеспечение (например, программные среды визуализации или драйверы внешних устройств), переводит подключённые аппаратные средства в режим ожидания или безопасного отключения питания и подтверждает остановку. После того как все компоненты подтвердили завершение, сервер также выключается. Такое упорядоченное завершение исключает «жёсткое» обесточивание оборудования и потерю данных, и гарантирует, что система готова к корректному следующему запуску.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№124032800018-5).*

#### Список использованных источников

1. Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation / A. D. Obukhov, A. Volkov, A. N. Pchelintsev [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 19. – P. 8058. – DOI 10.3390/s23198058.
2. Архитектура, модели и алгоритмы обработки информации мобильной тренажерной системы для опорно-двигательной реабилитации / А. Д. Обухов, А. О. Назарова, А. А. Волков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25, № 8. – С. 415-424. – DOI 10.17587/mau.25.415-424.

УДК 004.9

**Рыбачок М.В., Лопатко А.С., Обухов А.Д.**  
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: obuhov.art@gmail.com

## **РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ВЕРХНИМ ЭКЗОСКЕЛЕТОМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ ДАННЫХ**

**Rybachok M.V., Lopatko A.S., Obukhov A.D.**  
Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: obuhov.art@gmail.com

### **DEVELOPMENT OF AN UPPER EXOSKELETON CONTROL ALGORITHM BASED ON MULTISENSORY DATA ANALYSIS**

*Аннотация.* Рассматривается алгоритм управления верхним экзоскелетом для профессиональных виртуальных тренажеров, основанный на анализе и обработке мультисенсорных данных и применение технологий машинного обучения. Представлена формализация алгоритма и основные подготовительные мероприятия.

*Ключевые слова:* верхний экзоскелет, машинное обучение, мультисенсорные данные, обработка информации, система управления.

*Abstract.* An upper exoskeleton control algorithm for professional virtual simulators based on the analysis and processing of multisensory data and the use of machine learning technologies is considered. The formalization of the algorithm and the main preparatory measures are presented.

*Keywords:* upper exoskeleton, machine learning, multisensory data, information processing, control system.

Современные технологии виртуальной реальности (VR) требуют высоких показателей погружения пользователя в виртуальную среду. В этой связи особое внимание уделяется разработке программно-аппаратных систем, повышающих реалистичность взаимодействия. Одним из ключевых инструментов является верхний экзоскелет, моделирующий поддержку и нагрузки на конечности и тело пользователя. Управление таким экзоскелетом предъявляет повышенные требования к точности позиционирования сегментов, особенно когда траектория движения не жёстко задана, а адаптируется к активности человека. Главная цель исследования – создать комплекс с мультисенсорным отслеживанием движений для безопасного и адаптивного управления экзоскелетом, обеспечив классификацию активности и точное позиционирование рук [1].

Для распознавания и классификации движений человека система управления использует разнообразные типы датчиков: электромиографические сенсоры (EMG) для регистрации мышечных сигналов, инерциальные навигационные модули (IMU) для отслеживания ориентации и ускорений, а также датчики компьютерного зрения и VR-трекеры.

Данные от разных сенсоров сначала синхронизируются по времени и приводятся к единому частотному потоку (например, 250 Гц), а также объединяются в окна фиксированной длительности (например, 5 с). В каждое окно применяются фильтры: для IMU – алгоритмы Калмана или Мэджвика, для EMG – полосовая фильтрация, для видео – методы компенсации дрейфа и шумов [2]. В результате формируются стандартизованные массивы данных, готовые к подаче на вход моделей машинного обучения для решения двух типов задач – классификации деятельности пользователя и прогнозирования положения сегментов тела. Для решения этих задач создаются и обучаются два типа моделей машинного обучения: регрессор (ML1) и классификатор (ML2). ML1 предсказывает текущие положения рук пользователя на основе отслеженных движений. ML2 классифицирует текущий набор признаков в заданные категории движений или упражнения. Указанные модели могут быть реализованы посредством классических алгоритмов (логистическая регрессия, метод ближайших соседей, деревья решений, ансамблевые методы), и глубокими нейросетями (MLP, CNN–GRU, Transformer, CNN–Transformer). Обученные модели интегрируются в цикл управления экзоскелетом как модуль поддержки принятия решений. Учитывая результаты обученных классификаторов, система может определить, является ли текущее действие пользователя штатным, или же требуется экстренное вмешательство.

Далее рассмотрим алгоритм управления экзоскелетом (рисунок 1).

Управление экзоскелетом организовано в виде циклического алгоритма с дискретным временным шагом. Ключевые этапы алгоритма:

1. Сбор данных: регулярный приём пакетов данных от всех сенсоров и накопление их в циклический буфер.
2. Предобработка: синхронизация потоков по меткам времени, фильтрация шумов и выравнивание данных.
3. Формирование окна: формирование массива фиксированной длительности и единой частоты, построение входных массивов.
4. Регрессия (ML1): предсказание координат рук.
5. Классификация (ML2): построение признаков для классификатора и вычисление вероятностей принадлежности к каждой категории действий. Определяется наиболее вероятное действие пользователя.
6. Проверка безопасности: если предсказанное действие не входит в множество разрешенных, либо рассчитанная траектория выходит за допустимые пределы, система переходит в режим аварийной остановки. Аварийная остановка также инициируется при превышении допустимой задержки вычислений или потере критических сенсоров.



Рис. 1. Алгоритм управления верхним экзоскелетом

7. Вычисление управляющих команд: при штатном режиме на основе предсказанного положения рук и типа действия генерируются команды для приводов экзоскелета, которые отправляются исполнительным механизмам.

8. Логирование и контроль: результаты каждого цикла (текущий класс действия, положение, статус) фиксируются, а система контролирует задержки и ресурсы. В случае выявления деградации работы активируется резервный сценарий или аварийная остановка.

Такой алгоритм обеспечивает непрерывную адаптивную работу экзоскелета: цикл либо продолжается в обычном режиме, либо прерывается при обнаружении аномалии на основе анализа ML-моделей.

Интеграция ML-моделей существенно повышает адаптивность управления экзоскелетом: обученные модели охватывают большое множество шаблонов поведения (включая аварийные сценарии), что позволяет симулировать их в безопасной виртуальной среде и гарантировать безопасность пользователя. Таким образом, разработанный подход обеспечивает формирование цифровой «тени» движений рук пользователя, что находит применение в виртуальных тренажерах и системах реабилитации. Алгоритм выступает связующим звеном между реальными действиями человека и их цифровым представлением. Его реализация позволит не только улучшить взаимодействие с экзоскелетом, но и использовать собранные данные для качественной реконструкции 3D-модели рук в виртуальных средах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка иммерсивной системы взаимодействия с виртуальной реальностью для профессиональной подготовки на основе всенаправленной платформы» (124102100628-3).*

#### Список использованных источников

1. Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation / A. D. Obukhov, A. Volkov, A. N. Pchelintsev [et al.] // Sensors. – 2023. – Vol. 23, No. 19. – P. 8058. – DOI 10.3390/s23198058.
2. Обухов, А. Д. Использование машинного обучения для классификации мышечной нагрузки / А. Д. Обухов, М. В. Рыбачок, Д. А. Побединский // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: Материалы X Международной научно-практической конференции, Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 298-302.

УДК 004.89

**Божий А.А., Максимов И.И., Круглов В.С., Обухов А.Д.**  
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: maks.shilcin@mail.ru

**РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕЛА И  
СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**Bozhii A.A., Maksimov I.I., Kruglov V.S., Obukhov A.D.**  
Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: maks.shilcin@mail.ru

**DEVELOPMENT OF A MODULE FOR DETERMINING BODY DIRECTION  
AND SPEED BASED ON DATA FROM INERTIAL MEASURING DEVICES**

*Аннотация.* В данной статье представлен модуль реального времени для оценки ориентации корпуса человека по данным с инерциального датчика, размещённого на поясе, и вычисления скорости движения по ускорениям с датчиков на ногах. Алгоритм реализует компенсацию смещения акселерометра, трапецеидальную интеграцию и ZUPT-обнуление скорости при обнаружении состояния покоя. Описаны архитектура системы и методы подавления дрейфа при интегрировании.

*Ключевые слова:* инерциальные датчики, IMU, ориентация тела, скорость движения, ZUPT, интеграция ускорений, Unity, реальное время.

*Abstract.* This article presents a real-time module for estimating the orientation of the human body based on data from an inertial sensor placed on the belt and calculating the speed of movement based on accelerations from sensors on the legs. The algorithm implements accelerometer offset compensation, trapezoidal integration, and ZUPT-zeroing the velocity when a resting state is detected. The architecture of the system and methods of drift suppression during integration are described.

*Keywords:* inertial sensors, IMU, body orientation, speed of movement, ZUPT, acceleration integration, Unity, real time.

Современные системы реабилитации и виртуальной реальности требуют точного отслеживания движений пользователя. Инерциальные датчики (IMU) позволяют реализовать отслеживание движения без оптических систем, однако двойная интеграция ускорений приводит к накоплению ошибки и дрейфу скорости.

В работе описывается практический модуль, в котором ориентация корпуса берется с поясного IMU, а скорость движения оценивается из ускорений ног с использованием детектора покоя (ZUPT) и компенсации смещений. Основные цели работы: обеспечение устойчивой оценки ориентации тела для управления направлением

движения в Unity; получение стабильной оценки линейной скорости, пригодной для геймплейной логики; реализация эффективного сетевого протокола обмена данными

Для решения задачи обработки данных создана четырехуровневая архитектура, включающая сетевой интерфейс, парсер пакетов, модуль оценки параметров движения и поток передачи данных в Unity.

Проблема дрейфа в разработанном модуле решается применением техники Zero Velocity Update (ZUPT). На основе полученных данных с инерциальных датчиков реализован комплекс алгоритмов обработки, направленных на повышение точности и устойчивости вычислений параметров движения. При разработке системы особое внимание уделялось компенсации дрейфа, фильтрации шумов и корректному определению состояния покоя.

Архитектура модуля использует библиотеку `python-core` для работы с сетью и обработки данных от трех инерциальных датчиков. Один датчик закреплен на поясе и определяет ориентацию тела в виде кватерниона, а два датчика на ногах измеряют ускорение при ходьбе для вычисления скорости движения.

Алгоритм вычисления скорости включает несколько этапов обработки. Для решения задачи компенсации дрейфа применяется метод экспоненциального усреднения смещения акселерометра. Когда система фиксирует состояние покоя, смещение обновляется с большей скоростью, а при активных движениях - медленнее, что обеспечивает стабильность оценок.

Первым этапом является удаление гравитации. Поскольку акселерометр измеряет не только движение человека, но и силу тяжести, используется метод вычитания гравитационной составляющей при обнаружении состояния покоя.

С целью повышения точности измерений реализована фильтрация шумов с использованием «мёртвой зоны», при котором значения ускорения меньше  $0.08 \text{ м/с}^2$  игнорируются. Это позволяет отфильтровать тепловой шум датчика и микровибрации.

Для расчёта скорости используется трапецеидальное интегрирование, обеспечивающее более точное определение линейной скорости. С каждым новым измерением скорость обновляется с учетом предыдущего значения ускорения.

Основываясь на анализе нормы угловых скоростей и значений ускорений, модуль определяет моменты покоя. Когда такое состояние продолжается дольше 30 миллисекунд, активируется алгоритм ZUPT: скорость плавно уменьшается и при достижении значения менее  $2 \text{ см/с}$  обнуляется, что предотвращает накопление интеграционных ошибок. Модуль постоянно получает пакеты данных от датчиков по сети. Для каждого пакета выполняется обработка: извлекается информация об ориентации тела из поясного датчика, вычисляется скорость движения из данных ножных датчиков, после чего результаты упаковываются в выходной пакет и отправляются в модуль Unity (Рис 1).

По результатам проведённых испытаний подтверждена эффективность предложенных алгоритмов обработки данных. Использование экспоненциальной компенсации смещения и ZUPT-коррекции позволило существенно снизить влияние

дрейфа, обеспечивая стабильный трекинг движений в реальном времени. Для удобства разработки модуль поддерживает режим симуляции с генерацией искусственных данных, имитирующих движение человека.

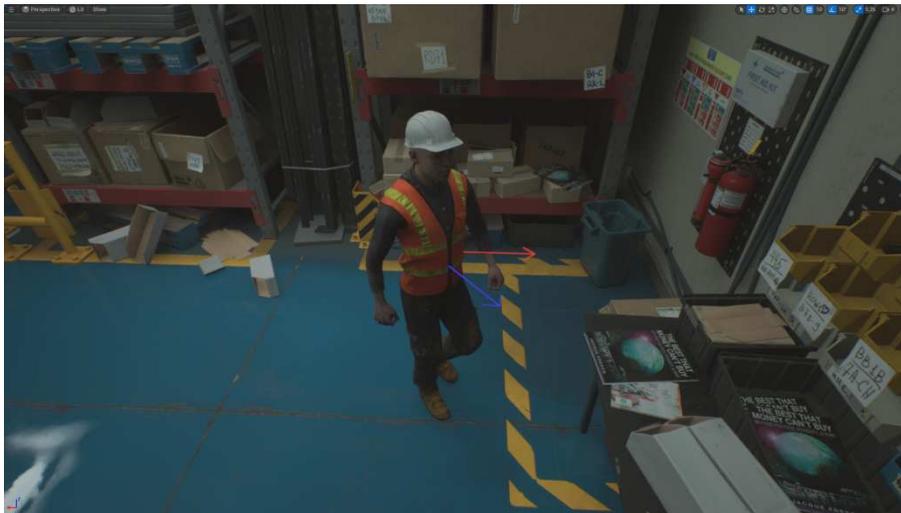


Рис. 1 Пример реализации модели с поворотом угла на  $30^\circ$

В ходе выполненной работы создан инженерный модуль, решающий задачу определения ориентации тела и скорости движения человека на основе данных инерциальных измерительных устройств. Система реализует обработку сигналов в реальном времени, включая фильтрацию, компенсацию смещения и коррекцию скорости методом ZUPT. Основываясь на экспериментальных данных, подтверждена устойчивость и точность работы модуля при различных типах движений. Полученные результаты демонстрируют пригодность системы для использования в реабилитационных комплексах и виртуальных средах, где требуется надёжное и стабильное отслеживание движений пользователя. Разработанный подход позволяет создавать независимые программно-аппаратные решения для отслеживания угла поворота тела и скорости движения пользователя на всенаправленных беговых платформах для виртуальной реальности, что особенно актуально в условиях необходимости импортозамещения подобных решений и их проприетарности.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка иммерсивной системы взаимодействия с виртуальной реальностью для профессиональной подготовки на основе всенаправленной платформы» (124102100628-3).*

#### Список использованных источников

1. Архитектура, модели и алгоритмы обработки информации мобильной тренажерной системы для опорно-двигательной реабилитации / А. Д. Обухов, А. О. Назарова, А. А. Волков [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25, № 8. – С. 415-424
2. Obukhov, A., Volkov, A., Nikitnikov, Y. Development of a Mobile Application for Musculoskeletal Rehabilitation Based on Computer Vision and Inertial Navigation Technologies //Technologies. – 2024, – Т. 12, С. 243.

УДК 004.9

**Меркурьев Я.В.Х., Патутин К.И., Волков А.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: didim@eclabs.ru

## **АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ ВИРТУАЛЬНОЙ СЦЕНЫ И ИМИТАЦИОННЫХ КОМПОНЕНТОВ В СИСТЕМЕ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ**

**Merkuryev Ya.V.Kh., Patutin K.I., Volkov A.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: didim@eclabs.ru

## **ALGORITHM OF ADAPTATION OF THE VIRTUAL SCENE AND SIMULATION COMPONENTS IN THE SYSTEM OF MUSCULOSKELETAL REHABILITATION**

*Аннотация.* Рассматривается алгоритм адаптации виртуальной сцены в системе опорно-двигательной реабилитации, основанный на обработке информации от биологической обратной связи. Анализ сведений о состоянии пользователя, его характеристике и выполняемых действиях позволяет осуществить адаптацию подсистемы визуализации и имитационных компонентов под индивидуальные особенности пользователя.

*Ключевые слова:* система опорно-двигательной реабилитации, имитационные компоненты, подсистема визуализации, адаптация, формализация алгоритма.

*Abstract.* An algorithm for adapting a virtual scene in a system of musculoskeletal rehabilitation based on the processing of information from biofeedback is considered. The analysis of information about the user's condition, its characteristics and the actions performed allows the adaptation of the visualization subsystem and simulation components to the individual characteristics of the user.

*Keywords:* musculoskeletal rehabilitation system, simulation components, visualization subsystem, adaptation, algorithm formalization.

В системах опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью особое место занимает динамическая адаптация виртуальной тренажерной сцены к текущему состоянию пациента. Такая адаптация обеспечивает персонализированную нагрузку: виртуальная среда автоматически изменяет сложность, темп и сценарий упражнения в реальном времени на основе физиологических показателей и поведения пользователя [1]. Благодаря этому тренировка остается достаточно сложной для дальнейшего прогресса, но не чрезмерной, чтобы избегать перегрузки или потери интереса, поддерживая оптимальное состояние у пациента. Реализация адаптации

может основываться как на данных биосенсоров (например, ЧСС, ЭЭГ, ЭМГ и др.), с помощью которых система фиксирует реакцию пользователя, либо на основе обработки текущей результативности пользователя в рамках упражнения (количество ошибок, точность и другие параметры), что в итоге приводит к коррекции виртуальной сцены или параметров имитационного оборудования. В результате система ОДР оперативно подстраивается под возможности пациента и данных БОС, обеспечивая оптимальное функционирование системы.

Для формального описания алгоритма адаптации также используем нотацию IDEF0. На верхнем уровне (рисунок 1) представлен весь алгоритм адаптации визуальной сцены в реабилитационной системе. Осуществим декомпозицию алгоритма и рассмотрим каждый из его этапов.

A1. Мониторинг физиологических показателей пользователя. Блок A1 отвечает за сбор и предварительную обработку физиологических данных пользователя в режиме реального времени. Сюда относятся показатели, характеризующие текущее физическое состояние пациента, которые могут варьироваться от области применения реабилитирующего тренажера и включать различные характеристики: частота сердечных сокращений (ЧСС), мышечная активность (электромиография, ЭМГ), вариабельность сердечного ритма, уровень кислорода в крови, частота дыхания, кожно-гальваническая реакция и др. В рамках блока A1 осуществляется непрерывный сбор сигналов с биосенсоров, фильтрация шума, требуемые преобразования (например, расчёт скользящего среднего ЧСС) для формирования набора актуальных значений физиологических параметров в удобном для последующего анализа формате.

A2. Мониторинг параметров выполнения упражнения пользователем. Блок A2 осуществляет сбор данных о поведении пользователя, т.е. о том, как он выполняет упражнение в виртуальной среде. Сюда относятся двигательные и поведенческие показатели: кинематические параметры движений (позиции конечностей, скорость и траектория движения, диапазон углов в суставах), показатели результата (количество успешно выполненных действий, промахов или ошибок, время реакции, баланс и координация и т.п.), а также любые данные об интеракции пользователя с VR-сценой (нажатие кнопок, взгляд на объекты и др.). Эти данные поступают либо напрямую от реабилитационного тренажера (например, углы поворота в суставах тренажёра, зарегистрированные датчиками) либо от программной среды VR (счёт игровых очков, пройденное расстояние в виртуальном пространстве и т.д.). Далее выполняется вычисление производных метрик – например, процента успешности, среднего времени на задание, отклонения траектории движения от эталонной. Результатом работы A2 являются количественные показатели эффективности и особенности текущего выполнения упражнения пользователем.

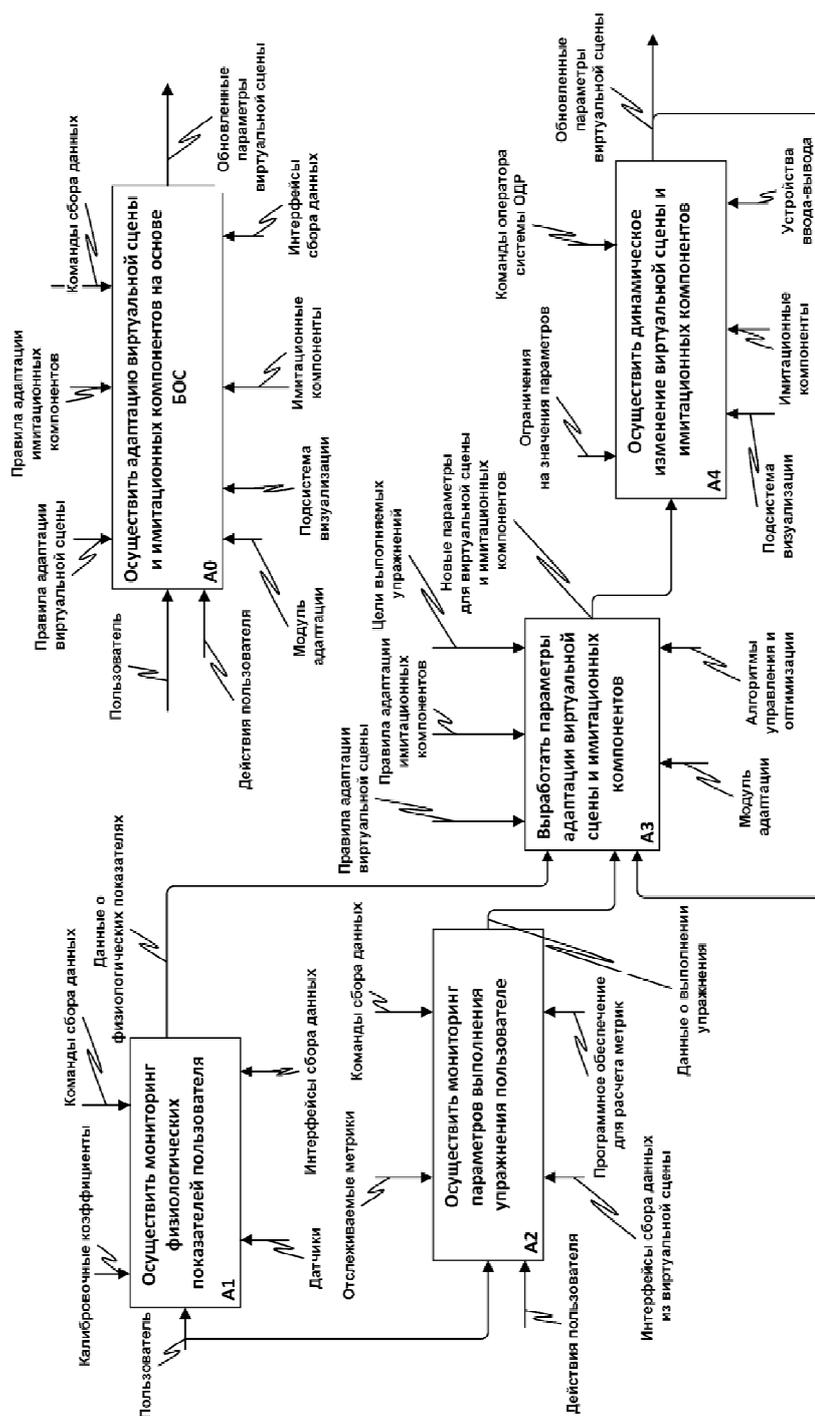


Рис. 1. Общая диаграмма алгоритма адаптации системы ОДР на основе БОС

A3. Выработка параметров адаптации визуальной сцены. Блок A3 является ключевым этапом алгоритма – здесь на основе информации о состоянии пользователя (выходы A1 и A2) вычисляются необходимые изменения параметров виртуальной сцены для поддержания оптимальной нагрузки, адаптируя упражнение под возможности пользователя в текущий момент [2]. Этап A3 можно реализовать различными методами: от простых правил (например, если ЧСС превысил порог – снизить скорость задания) до сложных моделей с использованием искусственного

интеллекта (машинное обучение, нечеткая логика, адаптивные регуляторы). В рамках базового подхода модуль адаптации сравнивает полученные показатели с целевыми или пороговыми значениями и решает, как скорректировать визуальные стимулы. Например, если пользователь легко справляется с заданием, модуль адаптации может увеличить сложность (ускорить движение целей, увеличить количество объектов или уменьшить их размер), а если наблюдается усталость или ошибки – снизить интенсивность. Таким образом, модуль адаптации генерирует новый набор параметров виртуальной сцены, оптимальный для текущего состояния пользователя. Эти параметры затем применяются в блоке А4 для непосредственного изменения сцены.

А4. Динамическое изменение визуальной сцены. Блок А4 осуществляет непосредственное внесение изменений в виртуальную сцену в соответствии с параметрами, рассчитанными в А3. Иначе говоря, А4 – это исполнительный модуль, который на основании заданных параметров конфигурирует или перестраивает виртуальное окружение во время работы приложения. Он получает на вход рекомендации от А3 и преобразует их в конкретные действия в VR-среде: изменяет свойства объектов, запускает или останавливает определённые события, переключает визуальные эффекты и т.д. Выходом блока А4 является обновленное визуальное представление – то, что видит пользователь в гарнитуре или на экране после адаптации.

После выполнения блока А4 цикл замыкается: пользователь воспринимает обновленную сцену, реагирует на нее, что фиксируется блоками А1 и А2, и процесс повторяется. Описанный многоуровневый алгоритм адаптации визуальной сцены с биологической обратной связью позволяет реабилитационной системе динамически персонализировать тренировку.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№124032800018-5).*

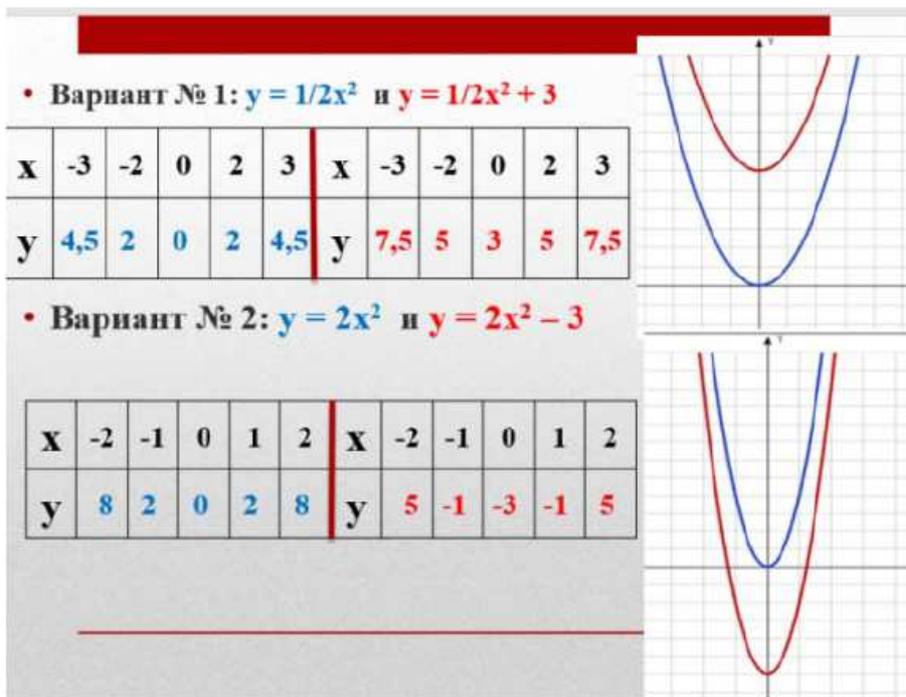
#### Список использованных источников

1. Обухов, А. Д. Структурная модель системы опорно - двигательной реабилитации с биологической обратной связью / А. Д. Обухов, А. А. Волков, В. С. Круглов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы X Международной научно-практической конференции, Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 70-73.

2. Обухов, А. Д. Критерии оптимизации виртуальных тренажеров с биологической обратной связью / А. Д. Обухов, В. С. Круглов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы X Международной научно-практической конференции, Тамбов, 21–22 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 211-214.

## Секция

# СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УЧЕБНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОТОТИПИРОВАНИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ПЕДАГОГИКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБУЧЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ В ОБРАЗОВАНИИ



УДК 004.946

**Шапович Е.Г., Самсоник Н.А.**

Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,  
Республика Беларусь, г. Барановичи  
e-mail: Evgeniy.shapovich@gmail.com

**ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ДЛЯ  
ПРОВЕДЕНИЯ ПРОФОРИЕНТАЦИИ БАРАНОВИЧСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Shapovich Y. G., Samsonik N. A.**

Educational Institution "Baranovichi State University",  
Republic of Belarus, Baranovichi  
e-mail: Evgeniy.shapovich@gmail.com

**AUGMENTED REALITY SOFTWARE FOR CAREER GUIDANCE AT  
BARANOVICHI STATE UNIVERSITY**

*Аннотация.* В статье представлено программное средство дополненной реальности, разработанное для повышения эффективности профориентационной работы Барановичского государственного университета. Приложение реализовано для автономной VR-гарнитуры Meta Quest 3 с использованием функции passthrough, что позволяет интегрировать интерактивные 3D-плитки факультетов в реальное окружение пользователя. Разработка выполнена в среде Unity с применением языка программирования C# и официальных инструментов Oculus Integration. Решение обеспечивает наглядную, интерактивную и технологически современную подачу информации, способствуя осознанному выбору будущей профессии абитуриентами.

*Ключевые слова:* дополненная реальность, профориентация, Unity, Meta Quest 3, C#, 3D-визуализация, виртуальная реальность, интерактивный интерфейс, образовательные технологии, XR.

*Abstract.* The article presents an augmented reality software tool designed to improve the effectiveness of career guidance at Baranovichi State University. The application is designed for the automatic VR headset Meta Quest 3 using walk-through technology, which allows you to integrate interactive 3D shark applications in a large user environment. The development is implemented among Unity using the C# programming language and other Oculus Integration interfaces. The solution provides a visual, interactive and technologically modern presentation of information, contributing to the informed choice of the future profession by applicants.

*Keywords:* augmented reality, career guidance, Unity, Meta Quest 3, C#, 3D visualization, virtual reality, interactive interface, educational technologies, XR.

Современные образовательные учреждения всё чаще обращаются к цифровым технологиям для повышения эффективности профориентационной работы. В условиях роста конкуренции за внимание абитуриентов и необходимости формирования осознанного выбора будущей профессии особенно востребованы интерактивные, визуально насыщенные и технологически продвинутые решения. Одним из таких решений является использование технологий дополненной реальности (далее — AR), позволяющих интегрировать цифровой контент в физическое пространство и обеспечить иммерсивный пользовательский опыт [1].

Целью данной работы является представление программного средства дополненной реальности, разработанного для проведения профориентации абитуриентов Барановичского государственного университета.

Одним из ключевых этапов реализации проекта является проектирование и создание 3D-плиток, каждая из которых представляет отдельный факультет университета. Эти плитки разрабатываются в среде Unity с использованием языка программирования C#, с учётом современных требований к производительности и визуальному качеству [2]. Особое внимание уделяется уровням детализации (LOD), позволяющим адаптировать отображение моделей в зависимости от расстояния до пользователя, снижая нагрузку на систему и обеспечивая плавную работу приложения. Плитки оформлены в едином стиле, легко масштабируются и визуально привлекательны, что способствует удержанию внимания пользователя.

Для обеспечения корректного позиционирования плиток в реальном пространстве реализуется интеграция системы inside-out трекинга, встроенной в гарнитуру Meta Quest 3. В рамках проекта используется Unity XR SDK совместно с Oculus Integration, что обеспечивает высокую точность отслеживания положения пользователя и объектов без необходимости применения внешних сенсоров. Это особенно важно для создания иммерсивной среды, в которой пользователь свободно перемещается и взаимодействует с элементами интерфейса, ощущая себя частью виртуального пространства.

Важным компонентом системы является разработка пользовательского интерфейса, адаптированного под управление с помощью контроллеров Meta Quest 3. На каждой 3D-плитке размещаются две интерактивные кнопки: «О факультете» и «Специальности» (рис. 1).

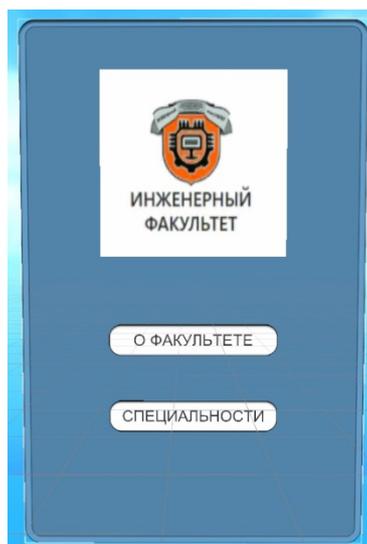


Рис. 1. Интерактивная 3D-плитка инженерного факультета

Первая кнопка открывает краткую информацию о факультете — его историю, направления подготовки, достижения и особенности (рис. 2).

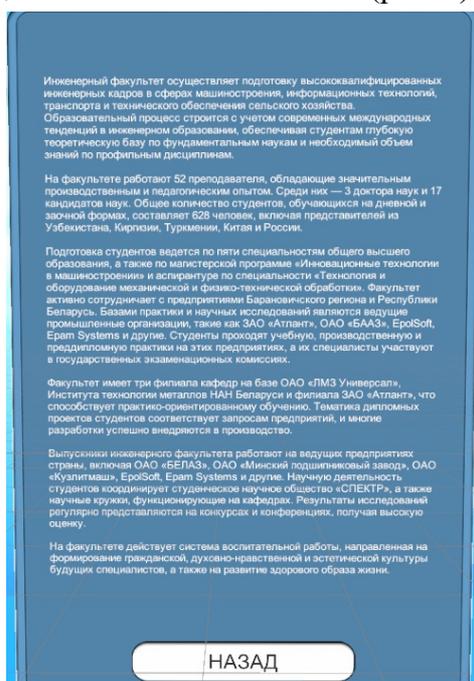


Рис. 2. Интерактивная 3D-плитка с отображением информации о инженерном факультете

Вторая предоставляет доступ к списку реализуемых специальностей с возможностью просмотра подробностей: описание программы, сроки обучения, перспективы трудоустройства и другие сведения.

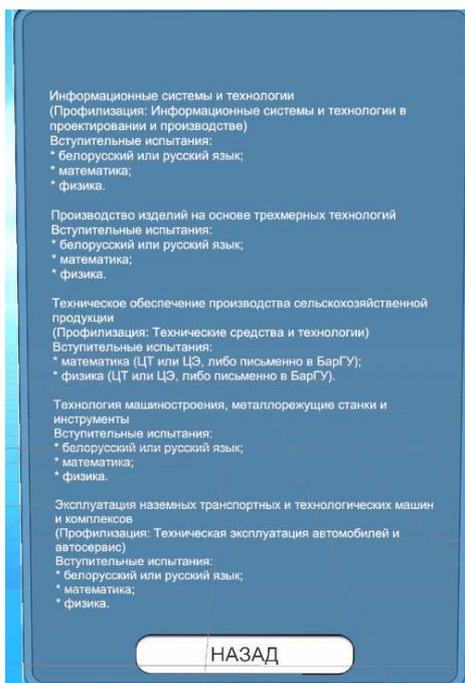


Рис. 3. Интерактивная 3D-плитка с отображением информации о специальностях факультета

Интерфейс оформлен с учётом требований к читаемости: используются чёткие шрифты, логичная структура и визуально сбалансированные элементы, обеспечивающие комфортное взаимодействие даже для пользователей без опыта работы с VR-устройствами.

Дополнительно в приложение интегрирован видеоролик о университете, который автоматически воспроизводится при входе в виртуальное пространство. Он служит вступительной презентацией учебного заведения, помогает пользователю сориентироваться в структуре вуза и усиливает визуальное восприятие, создавая эффект присутствия и вовлеченности (рис. 4).

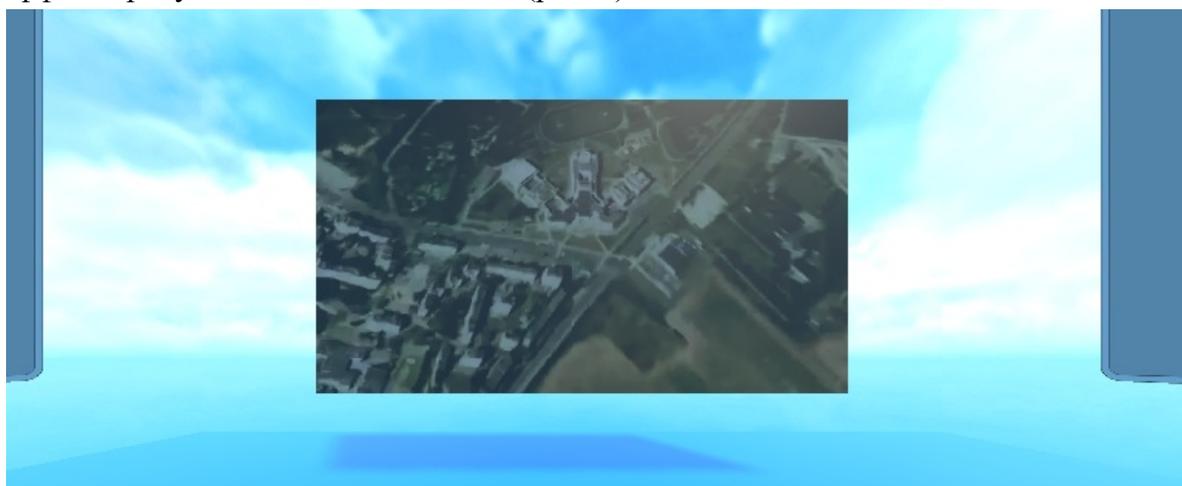


Рис. 4. Интерактивная 3D-плитка с отображением видеоролика

Разработанное программное средство дополненной реальности успешно демонстрирует потенциал XR-технологий в образовательной сфере, в частности — в профориентационной деятельности вуза. Благодаря использованию автономной гарнитуры Meta Quest 3 и функции passthrough удалось создать гибридную среду, в которой цифровой контент органично дополняет физическое пространство, обеспечивая высокий уровень вовлечённости и удобства восприятия информации.

Интерактивные 3D-плитки факультетов, снабжённые интуитивно понятными элементами управления, позволяют пользователям быстро находить информацию о структуре университета, направлениях подготовки и специальностях. Интеграция видеоролика о вузе при запуске приложения усиливает эффект присутствия и создаёт положительное первое впечатление.

Приложение полностью автономно, не требует внешних сенсоров или маркеров, оптимизировано под аппаратные ограничения устройства и не использует сторонние библиотеки отслеживания. Это делает его стабильным, легко развертываемым и пригодным для использования в реальных условиях — на днях открытых дверей, в приёмных комиссиях и на выставках образовательных услуг.

В перспективе планируется расширение функционала за счёт интерактивных 3D-туров по лабораториям, элементов геймификации и интеграции с университетским порталом. Таким образом, представленное решение не только решает актуальную задачу профориентации, но и закладывает основу для дальнейшего развития цифровой образовательной экосистемы Барановичского государственного университета.

#### Список использованных источников

1. Калько, А. И. Приложение для демонстрации данных в виде виртуальных 3D-Объектов с дополненной реальностью / А. И. Калько, О. Д. Хадарович // BIG DATA и анализ высокого уровня = BIG DATA and Advanced Analytics : сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции, Минск, 17–18 мая 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. — Минск, 2023. — С. 351-358.

2. Официальный сайт Unity — URL: <https://unity.com/ru/> (дата обращения: 05.11.2025).

УДК 4.009

**Мокрозуб В.Г., Скворцова А.А., Кривенцев А.Н., Полянский А.В.**  
Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: mokrozubv@yandex.ru

## **СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ УЧЕБНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ И РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Mokrozub V.G., Skvortsova A.A., Kriventsev A.N., Polyansky A.V.**  
Tambov State Technical University, Tambov, Russia  
e-mail: mokrozubv@yandex.ru

## **CREATION OF ELECTRONIC EDUCATIONAL MATERIALS FOR STUDYING AND CALCULATING TECHNOLOGICAL EQUIPMENT**

*Аннотация.* Представлены примеры создания электронных учебных материалов, предназначенных для изучения конструирования и расчета технологического оборудования.

*Ключевые слова:* технологическое оборудование, 3D-модели, расчет.

*Abstract.* Examples of the creation of electronic educational materials designed to study the design and calculation of technological equipment are presented.

*Keywords:* technological equipment, 3D models, calculations.

Использованию современных подходов к представлению обучающих материалов в настоящее время уделяется большое внимание [1]. Особенно это актуально в науках, изучающих конструкции технических объектов [2,3].

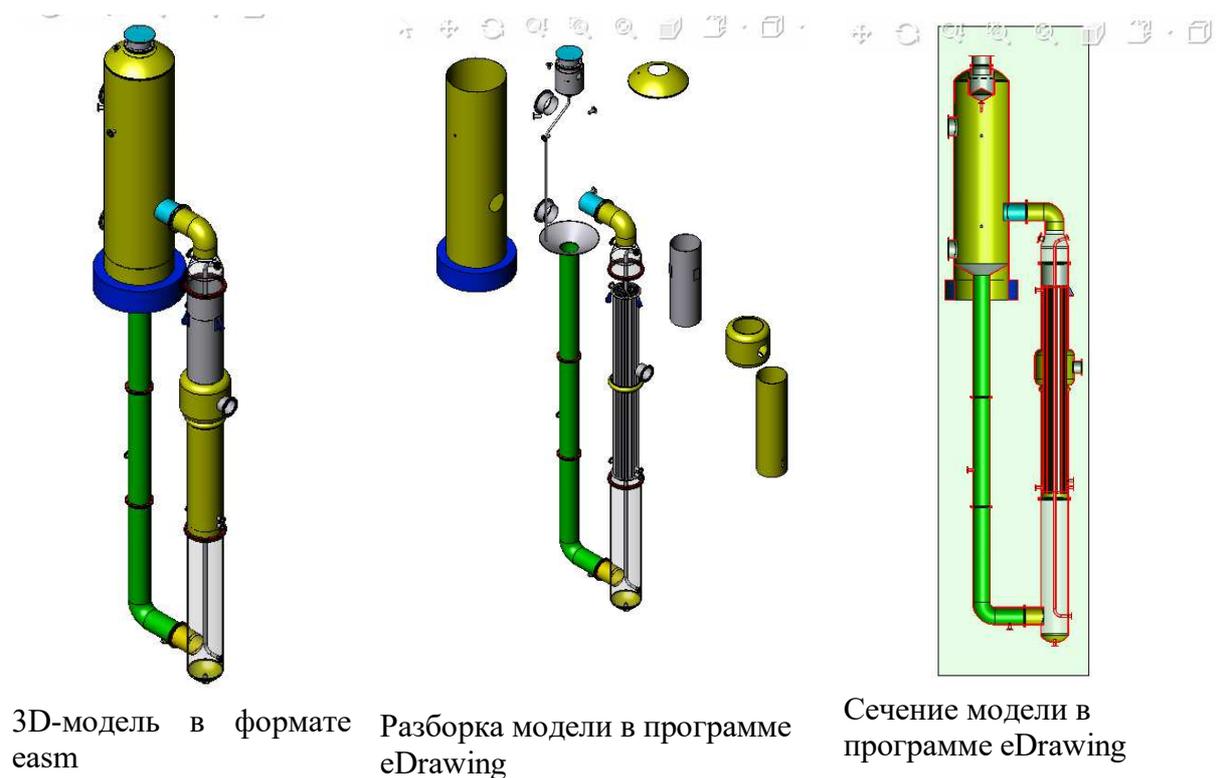
Авторами разрабатываются учебные материалы, предназначенные для изучения конструирования и расчета технологического оборудования. На первый план здесь выходят две задачи:

- трехмерное представление изучаемого объекта (3D-модель);
- расчет изучаемых объектов.

3D-модель изучаемого технического объекта должна быть небольшой по размеру с одной стороны, с другой – должна позволять разбирать объект на отдельные элементы.

Этим требованиям удовлетворяет формат easm Solidworks, который открывается программой свободного доступа eDrawings.

На рис. 1 и рис. 2 представлены возможности eDrawings. К сожалению, альтернативной программы российские разработчики пока не создали.

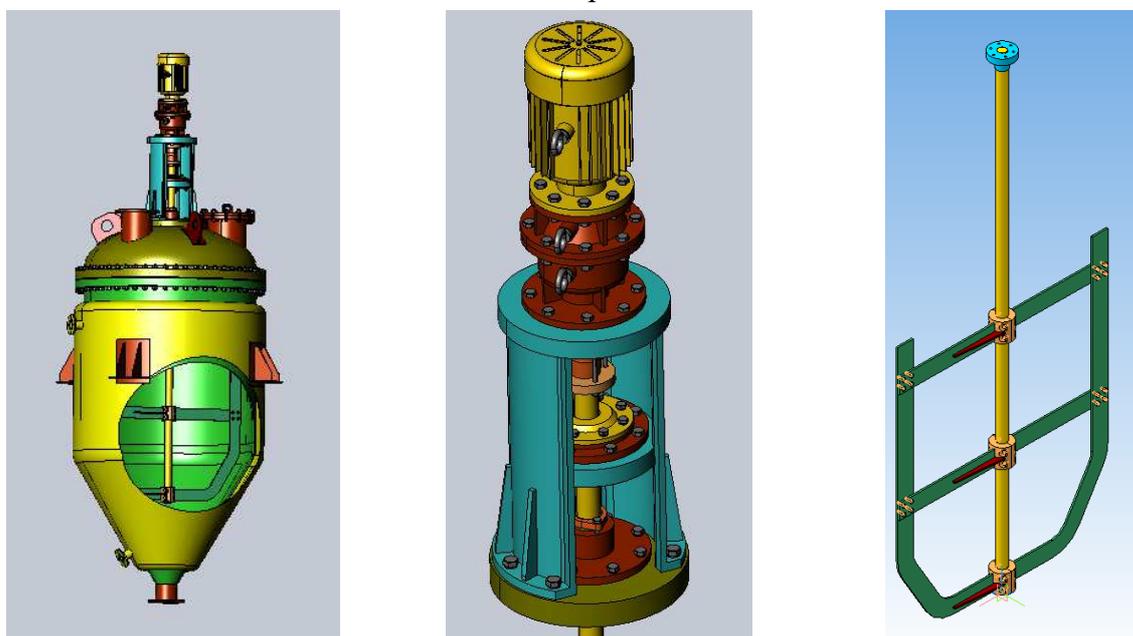


3D-модель в формате easm

Разборка модели в программе eDrawing

Сечение модели в программе eDrawing

Рис. 1. Возможности программы eDrawing при изучении конструкции выпарного аппарата



Кристаллизатор с перемешивающим устройством

Привод перемешивающего устройства

Перемешивающее устройство

Рис. 2. Кристаллизатор с перемешивающим устройством

Расчеты технологического оборудования удобно выполнять в программе MathCad, так здесь видна методика расчета. Отечественная разработка Smath не уступает

MathCad и может быть рекомендована для проведения расчетов химического оборудования.

На рис. 3 представлены исходные данные разработанной программы для расчета на прочность гибкого консольного вала в среде Smath.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ		
Давление рабочее, МПа	в емкости	$P := 0,6$
	в рубашке	$P_{руб} := 0,6$
Давление пробное, МПа	в емкости	$P_{пр} := 0,82$
	в рубашке	$P_{пр,руб} := 0,82$
Температура стенки расчетная, °C		$t := 151$
Основные размеры аппарата, м		
	диаметр цилиндрической обечайки аппарата	$D := 2,400$
	толщина цилиндрической обечайки аппарата	$s := 0,020$
	толщина верхнего торосферического днища аппарата	$s_{дв} := 0,012$
	толщина нижнего торосферического днища аппарата	$s_{дн} := 0,020$
	диаметр цилиндрической обечайки рубашки	$D_I := 2,600$
	толщина цилиндрической обечайки рубашки	$s_I := 0,012$
	толщина торосферического днища рубашки	$s_{днI} := 0,012$
Материал рассчитываемых элементов		
	аппарат	12X18H10T
	рубашка	09Г2С
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии корпуса аппарата, м		$c := 0,002$
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии рубашки, м		$c_I := 0,002$

Рис. 3. Исходные данные для расчета на прочность гибкого консольного вала в среде Smath

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Визуализация цифровой трансформации промышленного производства в образовательный процесс / В. А. Немтинов, А. Б. Борисенко, В. В. Морозов [и др.] // Научная визуализация. – 2022. – Т. 14, № 3. – С. 47-62. – DOI 10.26583/sv.14.3.04. – EDN DXZRYU.
3. Повышение уровня заинтересованности студентов при изучении профильных дисциплин с использованием VR-технологии / В. А. Немтинов, Н. Ц. Гатапова, А. Б. Борисенко [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2023. – № 2(88). – С. 152-163. – DOI 10.17277/voprosy.2023.02.pp.152-163. – EDN OFEEDY.
4. Комплексное использование различных программных сред для повышения уровня визуализации и восприятия информации / В. А. Немтинов, А. А. Родина, А. Б. Борисенко [и др.] // Научная визуализация. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 1-10. – DOI 10.26583/sv.15.2.01. – EDN LPKBSQ.

УДК 004.853

**Протасова Ю.В.<sup>1</sup>, Морозов В.В.<sup>2</sup>, Немтинов В.А.<sup>3</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: julia.nemtinova@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: tmb-morozov@yandex.ru

<sup>3</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**ОРГАНИЗАЦИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ LMS MOODLE И СИСТЕМОЙ  
ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА  
3DVISTA**

**Protasova Y.V.<sup>1</sup>, Morozov V.V.<sup>2</sup>, Nemtinov V.A.<sup>3</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: julia.nemtinova@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: tmb-morozov@yandex.ru

<sup>3</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**ORGANIZATION OF COMMUNICATION BETWEEN LMS MOODLE AND  
THE VISUALIZATION SYSTEM OF THE 3DVISTA VIRTUAL EDUCATIONAL  
SPACE**

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы интеграции интерактивных образовательных сред с системами управления обучением (LMS). На примере связки визуализатора 3DVista Virtual Tour (VT PRO) и LMS Moodle анализируются практически способ передачи данных и оценок: автоматизированная передача через стандарт SCORM 1.2 и ручной импорт через CSV.

*Ключевые слова:* система управления обучением, инструменты иммерсивной визуализации, LMS Moodle, 3Dvista, SCORM.

*Abstract.* The issues of integration of interactive educational environments with learning management systems (LMS) are considered. Using the example of a bundle of the 3DVista Virtual Tour (VT PRO) visualizer and LMS Moodle, a practical way of transmitting data and ratings is analyzed: automated transmission via the SCORM 1.2 standard and manual import via CSV.

*Keywords:* learning management system, immersive visualization tools, LMS Moodle, 3DVista, SCORM.

Цель данной работы - это систематизация и описание технически реализуемых путей интеграции 3DVista и Moodle, формализация модели преобразования первичных метрик в итоговую оценку и предложение структуры модели проектирования для исследовательской и практической реализации.

LMS Moodle является одной из наиболее распространенных образовательных сред, предлагает развитую систему оценивания и построения отчетов через журнал оценок (Gradebook). Однако сам по себе Moodle не предназначен для сбора данных из внешних интерактивных обучающих сред. Таким образом, возникает актуальная задача организации надежного и технически устойчивого канала для передачи данных из виртуального тура 3DVista в журнал оценок Moodle [1 - 4].

Схема взаимодействия между студентом, виртуальным туром, реализованном в 3DVista и LMS Moodle может быть представлена следующим образом см. рис. 1.

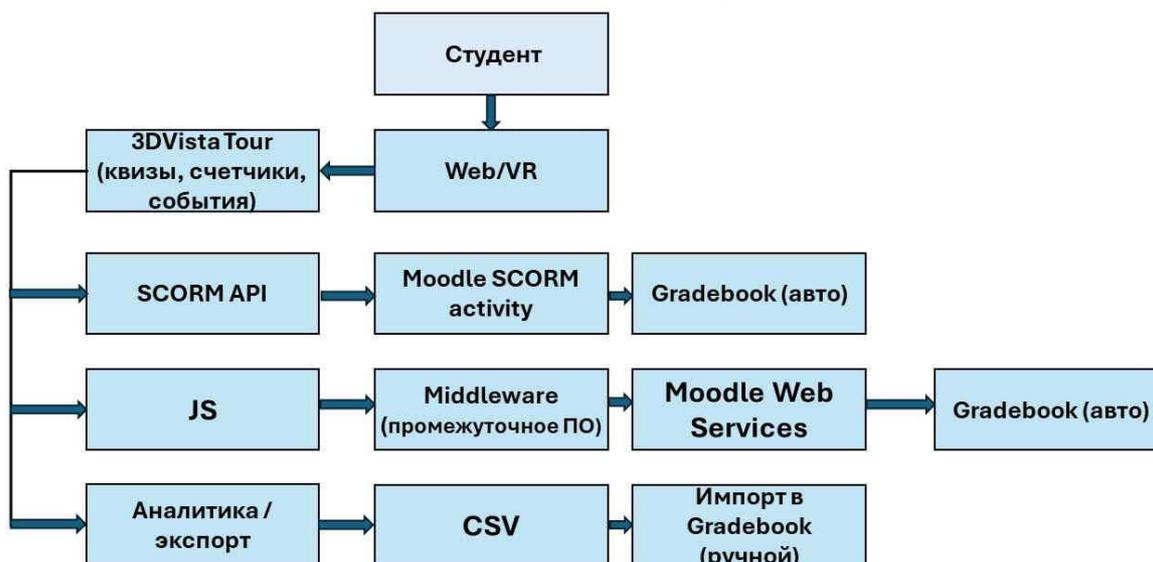


Рис. 1. Структурная схема организации связи между LMS Moodle 3DVista VT Pro  
Созданный тур (в 3DVista) упаковывается в SCORM-пакет и загружается в Moodle как элемент типа «SCORM/AICC» (рис. 2).

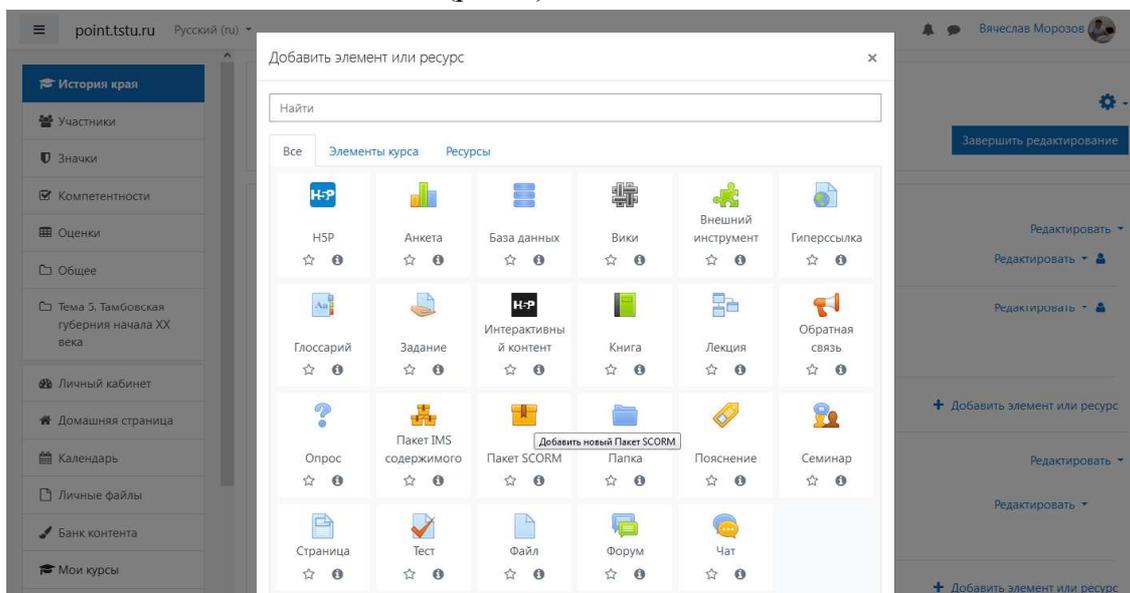


Рис. 2. Визуализация интерфейса LMS Moodle при интеграции виртуального тура, созданного в 3DVista, с использованием SCORM-пакета

3DVista предоставляет возможность экспорта результатов всех студентов в CSV-файл. Преподаватель вручную загружает этот файл в журнал оценок Moodle через встроенную функцию импорта.

Преимущества данного способа интеграции в простоте: не требуется технических навыков для настройки автоматической передачи. Преподаватель может просмотреть данные и отфильтровать их перед импортом.

Главный недостаток в трудоемкости - не подходит для больших групп и частого использования. Студент не получает мгновенной обратной связи через журнал.

Разработанная модель организации взаимодействия между системой управления обучением LMS Moodle и средой визуализации 3DVista Virtual Tour Pro была апробирована в процессе создания и внедрения образовательного контента, обеспечивающего иммерсивное погружение обучающихся в виртуальное тематическое пространство [5- -9].

Технология применена при реализации учебного курса «История Тамбовского края», входящего в образовательные программы подготовки специалистов различных направлений в учреждениях высшего и среднего профессионального образования Тамбовской области.

На рисунке 3 представлен фрагмент интерактивного квеста по экспозиции Дома-музея Г. В. Чичерина, интегрированного в виртуальную образовательную среду посредством SCORM-механизма. Сценарий квеста позволяет обучающемуся выполнять задания по историческим объектам региона, формируя навыки исследовательской работы и работы с цифровыми источниками.

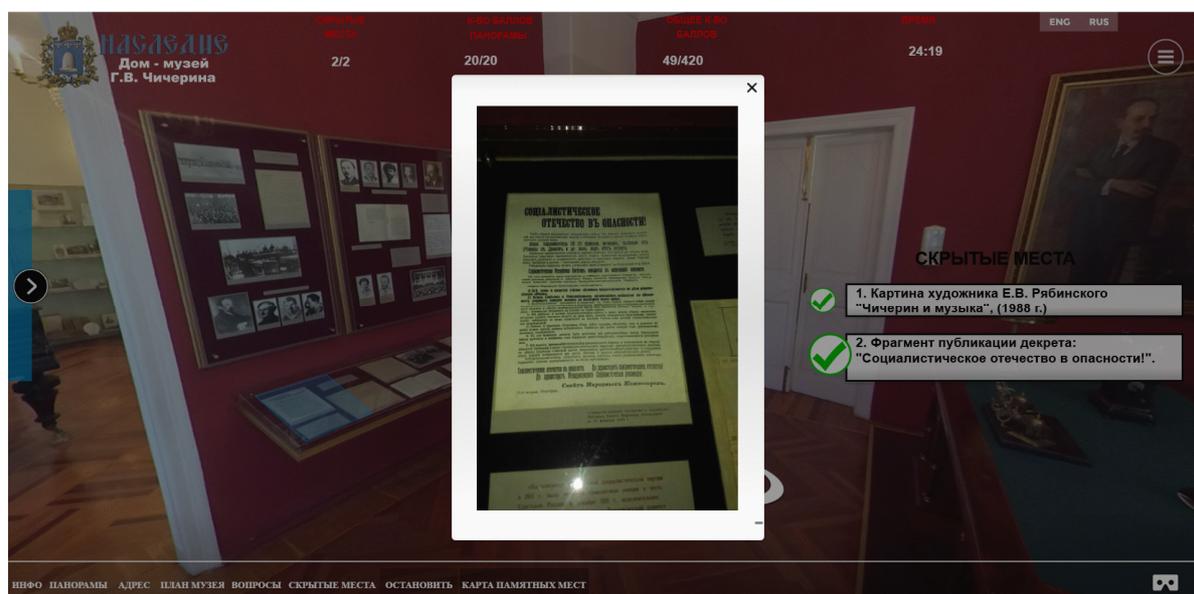


Рис. 3. Фрагмент квеста в виртуальном туре по Дому-музею Г. В. Чичерина, отражающий поиск скрытых интерактивных элементов в образовательной VR-среде

Проведённая апробация показала, что предложенная архитектура интеграции 3DVista ↔ Moodle обеспечивает устойчивую передачу учебных метрик, автоматическую фиксацию результатов и позволяет создавать контент, сочетающий виртуальную реконструкцию, интерактивное обучение и оценку компетенций в едином цифровом контуре.

#### Список использованных источников

1. Царапкина Ю. М., Якубова Э. Ю. Использование технологии «веб-квест» в профессиональном самоопределении // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: информатизация образования. 2018. Т. 15. № 4. С. 373–381. DOI: 10.22363/2312-8631-2018-15-4-373-381.
2. Mokrozub V. G., Molotkova N. V., Mishchenko E. S., Aleynikova K. A. The Development of Intelligent Educational Content // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2022. Vol. 56, No. 2. P. 55-62. DOI: 10.3103/s0005105522020042.
3. Virtual Tours in E-Learning, Training & Quizzing. 2020. <https://blog.3dvista.com/2020/04/27/virtual-tours-in-e-learning-training-quizzing/> (Дата обращения: 05.10.2025).
4. Повышение уровня профессиональных компетенций с использованием виртуальной образовательной среды / В. А. Немтинов, А. Б. Борисенко, В. В. Морозов, Ю. В. Немтинова // Высшее образование в России. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 104-113. – DOI 10.31992/0869-3617-2021-30-3-104-113. – EDN AIOTFA.
5. Создание виртуальной образовательной среды с использованием технологии квестов / В. А. Немтинов, А. Б. Борисенко, Ю. В. Немтинова [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. Т. 26, № 4. С. 529-539. DOI: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.529-539. EDN ZNZCUX.
6. Krasnyansky M. N., Mokrozub V. G., Timonin A.S. Prospects for the Application of Digital Twin Systems and the Intellectualization of Calculations for the Strength of Chemical Equipment // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2022. Vol. 57, No.32. P. 140-144. DOI: 10.3103/S0005105523030020.
7. Немтинов В. А., Родина А. А., Борисенко А. Б. [и др.] Комплексное использование различных программных сред для повышения уровня визуализации и восприятия информации // Научная визуализация. 2023. Т. 15, № 2. С. 1-10. DOI: 10.26583/sv.15.2.01. EDN LPKBSQ
8. Krasnyanskiy M., Obukhov A., Dedov D., Siukhin A. Modeling of the learning process in adaptive training complexes // Journal of Applied Engineering Science. 2018. Vol. 16, No. 4. P. 487-493. DOI: 10.5937/jaes16-17627. EDN PYWCTM.
9. Zaitseva N. A., Sizova Z. M., Chauzova V. A., Larionova A. A. Determining the Readiness Status of University Students in STEM Education and Distance Education Course // International Journal of Emerging Technologies in Learning. 2021. Vol. 16, No. 19. P. 124-138. DOI 10.3991/ijet.v16i19.26047. EDN BRIJAL.

# Секция

## ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН



УДК 654.931

**Казначеева Н.В.<sup>1</sup>, Немтинов В.А.<sup>2</sup>**

Тамбовский Государственный Технический университет, Россия, г.Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: nvkaznacheeva@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ  
ФОРМИРОВАНИИ ПЕРСОНАЛЬНОГО ИМИДЖА ОРГАНИЗАЦИИ**

**Kaznacheeva N.V.<sup>1</sup>, Nemtinov V.A.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: nvkaznacheeva@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**SYSTEM ANALYSIS OF COMPLEX DECISIONS IN THE FORMATION  
OF AN ORGANIZATION'S PERSONAL IMAGE**

*Аннотация.* Рассмотрены теоретические аспекты анализа комплексных решений при формировании персонального имиджа организации и в качестве примера даны практические рекомендации по формированию персонального имиджа для предполагаемой организации. Выполнена апробация технологии анализа при формировании персонального имиджа организации на примере тестовых данных предприятия машиностроительного профиля.

*Ключевые слова:* персональный имидж, системный анализ, формирование имиджа организации.

*Abstract.* The theoretical aspects of the analysis of complex solutions in the formation of the personal image of an organization are considered and, as an example, practical recommendations on the formation of a personal image for the proposed organization are given. The technology of analysis in the formation of the personal image of the organization has been tested using the example of test data of a machine-building enterprise.

*Keywords:* personal image, system analysis, organization image formation.

В современных условиях на рынке, эффективное управление персональным имиджем организации приобретает важнейшее значение. Имидж не только является ключевым фактором влияния на принятие решения, играет важную роль в формировании позитивного отношения потенциальных клиентов, привлечении высококвалифицированных сотрудников и обеспечении устойчивого успеха на рынке. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки системного и комплексного подхода к формированию позитивного и узнаваемого имиджа организации. Такой подход должен способствовать не только установлению долгосрочных отношений доверия с клиентами, но и созданию устойчивого конкурентного преимущества на рынке. Цель нашего исследования заключается в анализе технологий формирования имиджа и в разработке конкретных рекомендаций, направленных на достижение позитивного отношения потенциальных клиентов и

партнеров. Для достижения данной цели предполагается решение ряда задач, включая анализ теоретических аспектов формирования корпоративного имиджа, изучение текущего состояния имиджа компании, выявление недостатков, разработку практических рекомендаций по улучшению восприятия бренда [1].

Поставленные цели могут быть достигнуты при решении следующих задач: изучить теоретические аспекты формирования имиджа организации; проанализировать текущий имидж; выявить недостатки имиджа компании; разработать практические рекомендации по улучшению имиджа организации.

В процессе исследования авторы использовали разнообразные методы: анализ имиджа организации; формирование целевого имиджа организации; разработка практических рекомендаций по формированию позитивного имиджа компании.

**Теоретические аспекты формирования персонального имиджа.** Понятие «имидж» появилось в научном дискурсе благодаря работам З. Фрейда и К. Болдуинга. В России имидж вошел в обиход в 1990-х, когда возникла потребность в формировании положительного образа публичных персон, знаменитостей и спортсменов.

Слово «имидж» можно перевести как «образ», «подобие» или «представление». Своего рода - внешний, видимый облик. Однако в настоящее время под имиджем чаще подразумевают сочетание внешнего образа, репутации и представлений о человеке или организации [2].

Обобщая эти понятия, имидж можно определить как образ человека или организации в представлении окружающих. Он включает в себя внешние и внутренние характеристики, его социальные роли и функции. Важной особенностью имиджа является то, что это не просто статичное отражение реальности, но и инструмент управления восприятием.

Имидж – сложное понятие, включающее внешний облик, внутренние качества, ожидания аудитории и многое другое. При этом важно разграничивать имидж и просто образ, поскольку имидж ориентирован на формирование определенной реакции окружающих.

Формирование имиджа зависит от социального опыта, от врожденных психологических и психоэмоциональных характеристик, в стремлении к подражанию авторитетным примерам, отказу от неэффективных методов и переходу к творческому самовыражению. Ключевыми моментами, обеспечивающими формирование и поддержание персонального имиджа, являются сильное внутреннее желание и способность действовать и контролировать поведение и актуализация самопрезентации.

Имидж выполняет как ценностные, так и технологические функции. К ценностным функциям относятся повышение самооценки, ощущение значимости, психотерапевтический эффект, повышение своей значимости в глазах окружающих. А технологические аспекты связаны больше с выбором эффективных инструментов.

Имидж организации - это образ компании, который складывается в глазах общественности, потенциальных клиентов и партнеров. Он формируется на основе

различных ассоциаций с брендом, качеством продукции и услуг, поведением сотрудников, социальной ответственностью компании [3, 4].

Имидж выполняет три основные задачи:

- Идентичность - помогает стать узнаваемым и отличимым от других в своей сфере или категории;
- Идеализации - помогает создать желаемый образ, который может не совпадать с реальным, но привлекает внимание и симпатию целевых аудиторий;
- Противопоставления - помогает выделиться из массы аналогичных, подчеркнуть свои особенности и уникальные преимущества, защитить свои интересы от конкурентов и критиков.

Таким образом, имидж выполняет ряд важных задач по позиционированию и формированию позитивного впечатления у потенциальных клиентов и партнеров. Чтобы глубже разобраться в структуре имиджа, обратимся к исследованиям экспертов в этой области.

Согласно исследованиям Центра политического консультирования «Никколо-М», имидж состоит из трех основных характеристик:

1) Персональные характеристики - это факторы, связанные с индивидуальностью и личными качествами, такими как его физический облик, психофизические свойства, черты характера, тип личности и т.д. Эти характеристики определяют, как объект воспринимает себя и как он проявляет себя в разных ситуациях;

2) Социальные характеристики - это факторы, связанные с социальным положением в обществе, статус, профессия, происхождение, образование, достаток и т.д. Все эти аспекты определяют, человек вписывается в общество и как он взаимодействует с другими людьми;

3) Символические характеристики - это факторы, связанные с ценностями, убеждениями, мировоззрением, а также с религией, культурой, которые он использует для своей идентификации.

Эти характеристики определяют, как человек понимает смысл своей жизни и как он выражает свою индивидуальность. Чтобы сформировать успешный персональный имидж, необходим комплексный подход, учитывающий, как внутренние, так и внешние характеристики. Грамотно сформированный имидж позволяет достичь расположения аудитории и повысить эффективность деятельности в избранной сфере. Для того, чтобы создать эффективный и устойчивый имидж компании, необходимо пройти четыре шага:

*Шаг 1* - анализ. На этом этапе проводится диагностика текущего имиджа компании, выявляются его сильные и слабые стороны, а также определяются целевые аудитории, их потребности, ожидания и предпочтения. Анализируются конкуренты, сложившаяся ситуация на рынке, тренды и риски. Для сбора и обработки информации используются различные методы, такие как опросы, интервью, фокус-группы, мониторинг СМИ, экспертные оценки и т.д.

*Шаг 2* - планирование. На этом этапе разрабатывается стратегия формирования имиджа организации, определяются цели, задачи, сроки, ресурсы и инструменты реализации. Формулируются ключевые сообщения, которые компания хочет донести до своей аудитории, выбираются каналы коммуникации и продвижения, через которые эти сообщения будут передаваться. Планирование включает в себя формирование необходимого бюджета, графика и плана мероприятий, контроль контрольных точек.

*Шаг 3* - реализация. На этом этапе осуществляется непосредственное внедрение стратегии имиджа компании на практике. Происходит создание и внедрение материалов взаимодействия и коммуникации, таких как слоган, логотип, сайт, буклеты, фирменный стиль, пресс-релизы, видео, создаются и оформляются социальные сети и т.д. Проводятся различные мероприятия, направленные на повышение узнаваемости и лояльности и формирование позитивной реакции к бренду - выставки, презентации, конференции, семинары, акции, вебинары, спонсорство, конкурсы и т.д.

*Шаг 4* - оценка. На этом этапе проводится анализ результатов, измеряется его эффективность и воздействие на целевую аудиторию. Используются различные показатели - уровень доверия, узнаваемости, рекомендаций, удовлетворенности, повышение продаж, рост повторных покупок и т.д.

При этом, обязательно анализируются и собираются негативные результаты, выявляются проблемы, ошибки, недостатки и возможности для улучшения имиджа [5, 6].

В заключение следует сказать, что в современном обществе каждый человек или организация хочет создать свой неподражаемый и уникальный имидж, чтобы быть более заметными в современном мире. Поэтому для любых компаний и специалистов очень важно уметь работать с персональным имиджем, грамотно его формировать, транслировать и поддерживать.

**Заключение.** В ходе исследования были рассмотрены теоретические аспекты формирования корпоративного имиджа, выделены его ключевые составляющие, а также рассмотрены этапы, шаги и факторы, влияющие на его формирование. Определение этапов имиджа поможет выявить ряд недостатков, которые могут негативно сказываться на восприятии организации клиентами и партнерами. Четкая и понятная модель имиджа организации должна формировать полное представление о том, каким образом следует корректировать имидж и улучшить его позитивные характеристики. К примеру, ключевыми направлениями улучшения могут быть:

1) Улучшение системы внедрения и адаптации новых сотрудников, разработать подробные чек-листы и понятные инструкции для новых сотрудников, внедрить регулярные встречи новичков и наставников. Это поможет обеспечить более эффективную адаптацию персонала и укрепление внутреннего имиджа работодателя;

2) Повышение вовлеченности персонала, регулярные опросы сотрудников, система предложений по улучшению работы и организация корпоративных мероприятий способствуют улучшению внутренней атмосферы, что отразится на общем восприятии компании внутри коллектива;

3) Усовершенствование системы обучения персонала, составление планов обучения с учетом потребностей подразделений, предоставление возможностей для дистанционного обучения и выделение бюджета для оплаты курсов повышения квалификации сотрудников содействуют профессиональному росту и формированию имиджа передовой организации;

4) Улучшение корпоративных коммуникаций с использованием еженедельных встреч руководителей подразделений, создание и внедрение общего чата для более тесного общения обеспечат эффективное внутреннее взаимодействие и повышают уровень информированности. Успешная реализация этих рекомендаций позволит организации улучшить и укрепить свою позицию не только на рынке, в управлении персоналом, но и повысить уровень лояльности клиентов и стать привлекательным местом работы для высококвалифицированных специалистов.

В заключении, необходимо подчеркнуть, что разработка и внедрение предложенных мероприятий по улучшению имиджа представляют собой важный этап в стратегическом управлении организацией. Эффективное управление имиджем включает в себя внутренние процессы, внимание к реакции существующего рынка, конкурентов и общественного мнения, а так же политической и геополитической обстановкой.

Результаты выполненного исследования были апробированы на примере тестовых данных организации машиностроительного профиля.

#### Список использованных источников

1. Антонов, В. Г. Изменения в системе управления организациями / В. Г. Антонов, Е. В. Купцова, Е. С. Купцова // Управление. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 90-98. – DOI 10.26425/2309-3633-2021-9-3-90-98. – EDN XEUYFM.

2. Белобрагин, В. В. Социально-психологические проблемы формирования персонального имиджа / В. В. Белобрагин, Т. С. Бардабашкина // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 7-3(121). – С. 141-143. – DOI 10.23670/IRJ.2022.121.7.104. – EDN HEJFKB.

3. Белоусова, М. Е. Проблемы управления персоналом в организации / М. Е. Белоусова // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2021. – № 1- 1(71). – С. 43-45. – DOI 10.24411/2411-0450-2021-1010. – EDN POBGUT.

4. Буряк, Н. Ю. Роль рекламы в современной экономике (социально - экономический аспект) / Н. Ю. Буряк // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2021. – № 4(54). – С. 17-22. – EDN CMELQH.

5 Analysis of decision-making options in complex technical system design / V. Nemtinov, A. Zazulya, V. Kapustin, Y. Nemtinova // Journal of Physics: Conference Series, Tambov, 14–16 ноября 2018 года. Vol. 1278. – Tambov: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012018. – DOI 10.1088/1742-6596/1278/1/012018. – EDN JZOKGV.

6. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

УДК 004.853

**Лобанов П.Г.<sup>1</sup>, Немтинов В.А.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: Lobanov.Pavel2003@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

## **ПРОЦЕДУРА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА УСТРАНЕНИЯ БРАКА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛОВ**

**Lobanov P. G., Nemtinov V. A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: Lobanov.Pavel2003@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

## **THE DECISION-MAKING PROCEDURE FOR CHOOSING THE OPTIMAL OPTION FOR ELIMINATING DEFECTS IN THE MANUFACTURE OF METAL PARTS**

*Аннотация.* Рассмотрен подход к выбору варианта устранения брака, базирующийся на использовании теории построения экспертных систем. Решена задача построения информационно-логической модели поддержки принятия решения при их выборе, позволяющей, в зависимости от заданных процессов устранения брака, сформировать допустимое множество используемого оборудования.

*Ключевые слова:* изделия из металлов, качество выпускаемой продукции, влияющие факторы, информационно-логическая модель, принятие решения.

*Abstract.* An approach to choosing a marriage elimination option based on the use of the theory of building expert systems is considered. The problem of constructing an information-logical decision support model for their selection has been solved, which allows, depending on the specified defect elimination processes, to form an acceptable set of equipment used.

*Keywords:* metal products, product quality, influencing factors, information and logical model, decision-making.

Данная работа посвящена вопросам разработки информационно-логической модели (ИЛМ) поддержки принятия решений при проведении технического контроля деталей из металлов.

Основным элементом системы поддержки принятия решения при проведении выявления и устранения брака является информационно-логическая модель (ИЛМ). В общем виде ИЛМ поддержки принятия решений представляет собой объединение множеств данных и связей между ними в виде правил. Отдельное производственное правило, содержащееся в базе знаний, состоит из двух частей: условной, состоящей из

элементарных предложений, соединенных логическими связками «и», «или», и заключения, включающего в себя одно или несколько предложений, выражающих либо некоторый факт, либо указание на определенное действие, подлежащее исполнению. [1, 2]. Таким образом, ИЛМ может быть представлена следующим кортежем:

$$M = (d_1, \dots, d_i, \dots, d_N, p_1, \dots, p_j, \dots, p_S),$$

где  $M$  – оператор ИЛМ;  $d_1, \dots, d_N$  – множество данных ИЛМ;  $p_1, \dots, p_S$  – множество правил.

В свою очередь правила, входящие в модель, построены по типу: если ... (условия выполняются), то ... (реализация следствия)

Рассмотрим правила, на основе которых должны приниматься решения по формированию перечня мероприятий выбора решения при устранении брака, выявленных в процессе изготовления детали. Они собраны экспертами и авторами. [3].

В настоящее время база содержит более 100 производственных правил, с помощью которых может быть сформирован оптимальный перечень мероприятий по устранению брака в процессе изготовления деталей из металлов.

а) *Правила выбора устранения брака в резьбовом соединении:*

а1) *если «брак детали» = «рваная резьба», то «решение» = «калибровка резьбы»;*

а2) *если «брак детали» = «провал калибра», то «решение» = «заварить отверстие и нарезать новую резьбу»;*

а3) *если «брак детали» = «провал калибра», то «решение» = «заварить отверстие и нарезать новую резьбу»;*

а4) *если «брак детали» = «задиры на внутренней резьбе», то «решение» = «калибровка резьбы»;*

...

б) *Правила выбора устранения брака поверхности детали:*

б1) *если «брак детали» = «не соответствие шероховатости», то «решение» = «зачистить»;*

б2) *если «брак детали» = «ступеньки на поверхности», то «решение» = «зачистить»;*

б3) *если «брак детали» = «заусенцы», то «зачистить»;*

б4) *если «брак детали» = «следы коррозии», то «решение» = «пескоструйная обработка»;*

...

в) *Правила выбора устранения брака в отверстиях детали:*

в1) *если «брак детали» = «не соответствие шероховатости», то «решение» = «зачистить»;*

в2) *если «брак детали» = «ступеньки в отверстиях», то «решение» = «зачистить»;*

в3) *если «брак детали» = «заусенцы», то «решение» = «зачистить»;*

в4) *если «брак детали» = «следы коррозии», то «решение» = «пескоструйная обработка»;*

...

В табл. 1 приведен фрагмент базы параметров, используемых при принятии решений устранения брака изготовленных деталей из металлов.

Авторами разработан программный комплекс, реализующий решение задачи информационной поддержки при проведении технического контроля деталей типа «Валы».

Апробация программного комплекса выполнена на примере детали «Вал ступенчатый» (см рис.1). Для устранения выявленного брака были выбраны следующие мероприятия: рваной резьбы – калибровка резьбы; задиры на внутренней резьбе – калибровка резьбы.

Таблица 1. Фрагмент базы параметров, используемых при принятии решений устранения брака изготовленных деталей из металлов

Номер правила	Вероятность устранения брака (баллы от 0 до 1)	Технологичность проведения процесса (баллы от 1 до 10)	Ориентировочная стоимость затрат на устранение брака 1 шт. (руб.)
a1	0,8	8,2	17
a2	0,8	7,3	13
a3	0,2	6,5	56
a4	0,2	8,2	17
б1	0,5	7,2	14
б2	0,9	9,7	31
б3	0,8	9,8	11
б4	0,2	8,2	17
в1	0,9	6,7	11
в2	0,2	8,2	17
в3	0,2	8,2	38
в4	0,2	8,2	24
...	...	...	...



а)



б)

Рис. 1(а, б). Дефекты резьбы:

а) – рваная резьба, б) – задиры на внутренней резьбе

Список использованных источников

1. Сараев А. Д., Щербина О. А. Системный анализ и современные информационные технологии //Труды Крымской Академии наук. — Симферополь: СОНАТ, 2006.-С.47-59
2. Рыбина, Г. В. Применение интеллектуального анализа данных для построения баз знаний интегрированных экспертных систем / Г. В. Рыбина // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 11. – С. 36 – 53.
3. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

УДК 004.9

**Ермаков Р.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: Roflexs@mail.ru

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С U – ОБРАЗНЫМИ ТРУБАМИ**

**Ermakov R.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: Roflexs@mail.ru

### **INFORMATION MODEL OF A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER WITH U-SHAPED TUBES**

*Аннотация.*: Представлена модель позиционирования элементов кожухотрубчатого теплообменника с U - образными трубами, которая предназначена для построения 3D-модели теплообменника с минимальным участием человека.

*Ключевые слова:* кожухотрубчатый теплообменник, модель, позиционирование элементов.

*Abstract.* A model of positioning elements of a shell-and-tube heat exchanger with U-shaped tubes is presented, which is designed to build a 3D model of a heat exchanger with minimal human involvement.

*Keywords:* shell-and-tube heat exchanger, model, positioning of elements.

В основе разработки современных систем автоматизированного проектирования химического оборудования, включая кожухотрубчатые теплообменники (КТ), лежат информационные модели, позволяющие получать конструкторскую документацию с минимальным участием человека [1].

Информационная модель состоит из реестра элементов КТ, модели определения размеров и модели позиционирования [2].

Модель позиционирования – позволяет описать расположение элементов проектируемого КТ в пространстве друг относительно друга.

Принцип построения модели позиционирования рассмотрим на примере элементов КТ, информационная модель которого в настоящее время составляется автором. На рис. 1 представлены элементы распределительной камеры КТ:

- фланец штуцера 1;
- штуцер 2;
- эллиптическое днище 3;

- кожух распределительной камеры 4;
- болт с гайкой 5;
- кожух основной камеры 6;
- седловидная опора 7;
- фланец кожуха основной камера 8;
- фланец кожуха распред. камеры 9.

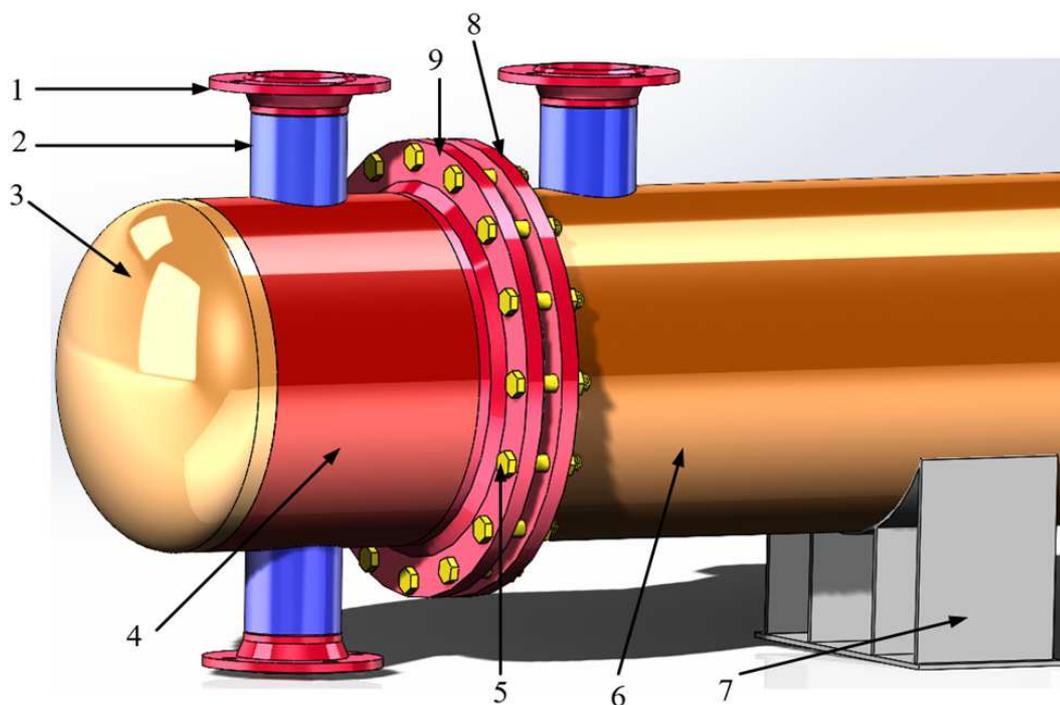


Рис. 1. Кожухотрубчатый теплообменник

Чтобы построить модель позиционирования кожухотрубчатого теплообменника требуется ввести конструктивные элементы деталей и сборок. К ним могут относиться: оси, плоскости, ребра и т.д.

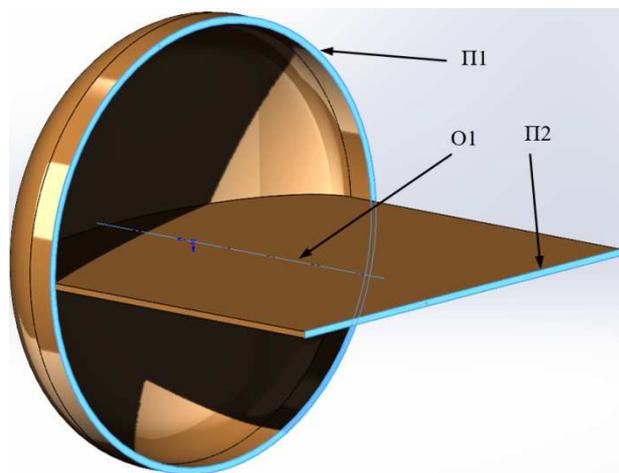
Для дальнейшей работы введем обозначения:

- О – оси;
- П – плоскости.

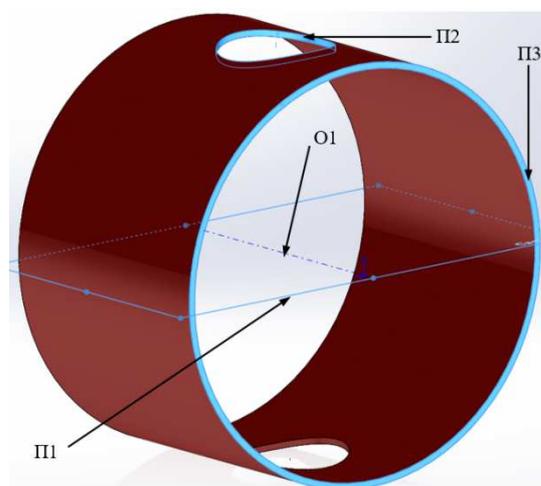
Сопряжения и ограничения конструктивных элементов бывают следующими: соосность, совпадение, параллельность, расположение под углом, расположение на расстоянии, касание и т.д. Обозначения используемых в модели позиционирования имеют следующий вид:

- $\dashv$  – соосность;
- $\}$  – совпадение;
- L – расстояние между поверхностями.

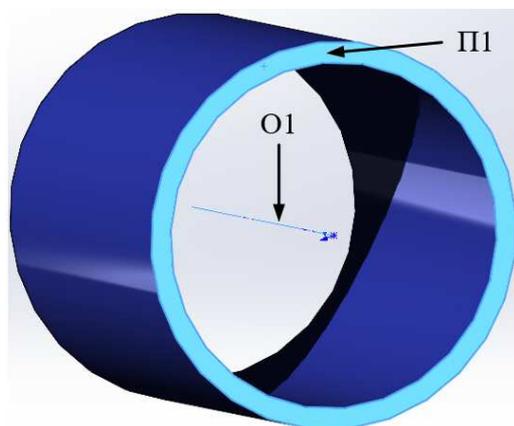
Пример обозначений сопрягаемых элементов КТ представлен на рис. 2.



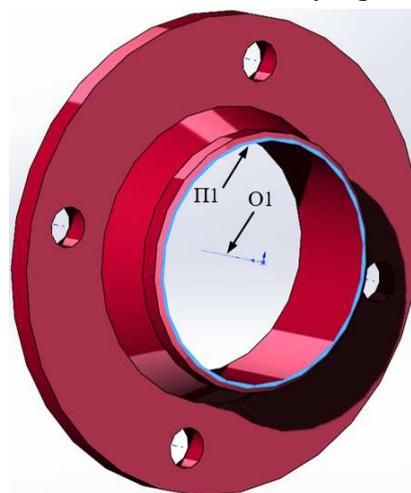
Эллиптическое днище с перегородкой



Штуцер



Кожух распределительной камеры



Фланец штуцера

Рис.2. Обозначения сопрягаемых элементов КТ

Пример позиционирования элементов КТ представлен в таблице 2.

Таблица 2. Пример позиционирования элементов КТ

Сопрягаемые детали (с указанием позиции на рисунках )	Сопрягаемые конструктивные элементы деталей
Эллиптическое днище 3 + Кожух распределительной камеры 4	Днище О1 } Кожух О1 Днище П1 } Кожух П1
Кожух распределительной камеры 4 + Штуцер 2	Кожух П2 → Штуцер О1 Кожух П1 } Штуцер П1 L=303мм.
Штуцер 2 + Фланец штуцера 1	Штуцер О1 } Фланец штуцера О1 Штуцер П1 } Фланец штуцера П1
Фланец кожуха распределительной камеры 9 + Кожух распределительной камеры 4	Фланец О1 } Кожух О1 Фланец П1 } Кожух П3

Представленная модель используется при разработке системы автоматизированного проектирования химического оборудования [3-6]

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

2. Альсаиди, А. А. М. Структура информационной модели кожухотрубчатого теплообменника / А. А. М. Альсаиди, В. Г. Мокрозуб // Цифровизация агропромышленного комплекса : Сборник научных статей: в 3-х томах, Тамбов, 23–25 октября 2024 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 85-87. – EDN FVIJSH.

3. Мокрозуб, В. Г. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника / В. Г. Мокрозуб, А. А. М. Альсаиди // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 4(54). – С. 595-606. – DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606. – EDN DNJZFN.

4. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364-373. – DOI 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373.

5. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326-331. – DOI 10.1007/s10556-017-0342-6. – EDN XNSPGA.

6. Mokrozub, V. G. Methods of increasing heat transfer in shell-and-tube heat exchangers / V. G. Mokrozub, A. A. M. Alsaeedi // The World of Science without Borders : Proceedings of the 11th all-Russian Scientific and Practical Conference for Young Researchers with International Participation, Tambov, 26 апреля 2024 года. – Tambov: Tambov State Technical University, 2024. – P. 28-30. – EDN BLNRWT.

УДК 004.9

**Степанян А.К.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: arthur95st@gmail.com

## **ПРОГРАММА ПОСТРОЕНИЯ ТРУБНОЙ РЕШЕТКИ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА**

**Stepanyan A.K.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: arthur95st@gmail.com

## **THE PROGRAM OF CONSTRUCTION OF A TUBE GRID OF A SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER**

*Аннотация.* Представлена программа построения трубной решетки в графическом редакторе Компас.

*Ключевые слова:* кожухотрубный теплообменник, трубная решетка, координаты отверстий, алгоритм расчета, САПР.

*Abstract:* A program for constructing a tube grid is presented in the Compass graphics editor.

*Keywords:* shell-and-tube heat exchanger, tube grid, hole coordinates, calculation algorithm, CAD.

Кожухотрубные теплообменники (КТТ) являются широко распространенным типом теплообменной аппаратуры в химической, нефтегазовой, энергетической и других отраслях промышленности [1]. Одним из ключевых элементов КТТ является трубная решетка, которая предназначена для крепления теплообменных труб и разделения трубного и межтрубного пространств.

Целью данной работы является разработка программы построения трубной решетки в среде графического редактора Компас. Язык программирования Python.

Исходными параметрами для расчета являются:

$D$  – диаметр трубной решетки;

$d_n$  – диаметр отверстия под трубу;

$t$  – шаг между отверстиями, определяемый как  $t = (1,25 \dots 1,4) \times d_n$ .

Алгоритм расчета параметров трубной решетки представлен в [2].

На рис. 1 представлен фрагмент программы ввода исходных данных и расчета основных параметров решетки.

```

import matplotlib.pyplot as plt
import math

print("Введите диаметр обечайки (мм)")
D = float(input()) # диаметр решетки
print("Введите диаметр трубы (мм)")
d_n = float(input()) # диаметр отверстия
k = 1.3 # коэффициент

# Расчет шага между отверстиями
t = k * d_n

# Считаем количество рядов
a = math.floor((D - d_n) / (2 * t) + 1)

# Максимальное количество отверстий в ряду
b = 2 * a - 1

# Радиусы
R = D / 2 # внешний радиус
R1 = (a - 1) * t # рабочий радиус

```

Рис. 1. Ввод исходных и расчет основных параметров решетки

Расчет координат отверстий центрального ряда представлен на рис. 2.

Расчет координат отверстий верхних и нижних рядов представлен на рис. 3.

```

# Список для координат всех отверстий
coord = []

# Центральный ряд (i = 0)
print("Добавляем центральный ряд...")
y0 = 0
for j in range(b):
    x0j = -R + j * t
    # Проверяем, чтобы отверстие не выходило за границы
    distance = math.sqrt(x0j * x0j + y0 * y0)
    if distance + d_n / 2 <= R1:
        coord.append((x0j, y0))

```

Рис. 2. Расчет координат отверстий центрального ряда

```

# Верхние и нижние ряды
for i in range(1, a):
    # Верхние ряды
    y_i = i * t * math.sqrt(3) / 2
    n_i = b - i # сколько отверстий в этом ряду
    offset_x = i * t * 0.5

    for j in range(n_i):
        x_ij = -R1 + offset_x + j * t
        coord.append((x_ij, y_i))
        print(f" Верхнее отверстие {len(coord)}: x={x_ij:.1f}, y={y_i:.1f}")

# Нижние ряды
y_neg_i = -i * t * math.sqrt(3) / 2
for j in range(n_i):
    x_ij = -R1 + offset_x + j * t
    coord.append((x_ij, y_neg_i))
    
```

Рис. 3. Расчет координат отверстий верхних и нижних рядов

На рис. 4 представлена визуализация решетки.

Представленная программа является элементом разрабатываемой с участием автора учебно-промышленной системы автоматизированного проектирования технологического оборудования [3-6].

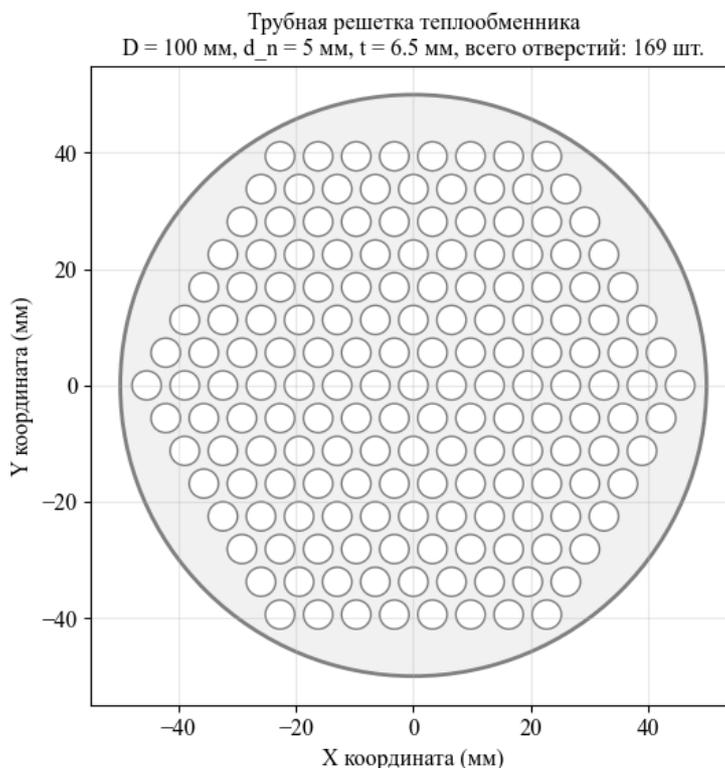


Рис. 4. Визуализация решетки

## Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Оборудование нефтепереработки, химических и нефтехимических производств: учебник / [Тимонин А.С. и др.]; под общ. ред. А.С. Тимонина и М.Н.Краснянского – Кадуга: Издательство ООО «Ноосфера. 2024 – 948 с.
3. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326-331. – DOI 10.1007/s10556-017-0342-6. – EDN XNSPGA.
4. Мокрозуб, В. Г. Система поддержки принятия решений при выборе типа кожухотрубчатого теплообменника / В. Г. Мокрозуб, А. А. М. Альсаиди // Онтология проектирования. – 2024. – Т. 14, № 4(54). – С. 595-606. – DOI 10.18287/2223-9537-2024-14-4-595-606. – EDN DNJZFN.
5. Мокрозуб, В. Г. Онтологический подход к структурному синтезу гальванических линий / В. Г. Мокрозуб, С. А. Санников // Системы управления и информационные технологии. – 2025. – № 2(100). – С. 82-87. – EDN XXBISQ
6. Мокрозуб, В. Г. Функциональная модель проектирования химико-технологических систем / В. Г. Мокрозуб, А. А. М. Альсаиди, Г. А. Дьяков // Инновационные материалы и технологии - 2024 : материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Минск, 31 марта – 04 2024 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2024. – С. 372-374. – EDN ITEXUP.

## Секция

### СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ



УДК 004.9

**Мокрозуб В.Г.<sup>1</sup>, Полянский А.В.<sup>2</sup>, Нагайцев И.В.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: mokrozubv@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: alexanderpolyanskiy@mail.ru

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ СВЕРЛЕНИЯ**

**Mokrozub V.G.<sup>1</sup>, Polyanskiy A.V.<sup>2</sup>, Nagaytsev I.V.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: mokrozubv@yandex.ru

<sup>2</sup>e-mail: alexanderpolyanskiy@mail.ru

## **INFORMATION MODEL FOR DETERMINING DRILLING MODES**

*Аннотация.* Представлено описание информационной модели, позволяющей определить режимы сверления в зависимости от материала заготовки и диаметра сверла

*Ключевые слова:* информационная модель, режимы резания, материал заготовки.

*Abstract.* An information model is described that makes it possible to determine drilling modes depending on the material of the workpiece and the diameter of the drill bit.

*Keywords:* information model, cutting modes, workpiece material.

Назначение режимов резания является одним из этапов разработки технологического процесса обработки деталей резанием. Режимы резания непосредственно влияют на экономические показатели производства. Например, выбор несоответствующих режимов приводит к преждевременному износу или поломке инструмента, увеличению времени обработки и, соответственно, к увеличению времени выпуска готовых изделий, а так же к браку (несоответствие чистоты поверхности, переходы, зарезы, и т.д) [1].

Одним из способов автоматизированного определения режимов резания является построение систем поддержки принятия решений с использованием методов искусственного интеллекта [2-4], в основе которых лежит информационная модель, позволяющая на основе исходных данных (материал, точность и др.) определить режимы резания (скорость резания, глубину резания).

Информационная модель базируется на правилах вида «Если ..., То ....». В части «Если» описываются исходные данные, в части «То» – результат.

Информационную модель, описывающую зависимость режимов резания (обороты шпинделя и подача) от материала заготовки и диаметра сверла можно описать кортежем:

$$IM = \langle M, D, S, F, G \rangle, \quad (1)$$

где  $M = \{m_{im}, im = 1 \dots IM\}$  – множество типов конструкционных материалов;  
 $D = \{d_{id}, id = 1 \dots ID\}$  – множество диаметров используемых свёрл;  
 $S = \{s_{is}, is = 1 \dots IS\}$  – множество значений допустимых подач;  
 $F = \{f_{if}, if = 1 \dots IF\}$  – множество значений допустимых оборотов шпинделя;  
 $G = \{MDSF, GR\}$  – ультраграф связей множеств  $M, D, S, F$ ;  
 $MDSF = MD \cup SF$  – множество вершин ультраграфа  $G$ ;  
 $MD \subset M \cup D$  – множество вершин истоков;  
 $SF \subset S \cup F$  – множество вершин стоков;  
 $GR = \{gr_k, k = 1 \dots K\}$  – множество ребер ультраграфа  $G$ ;  
 $gr_k(Y_k)$  –  $k$ -тое ребро ультраграфа,  $Y_k \subset MDSF$  – множество вершин инцидентных  $k$ -му ребру гиперграфа.

На рис. 1 представлена графическая иллюстрация информационной модели (1).

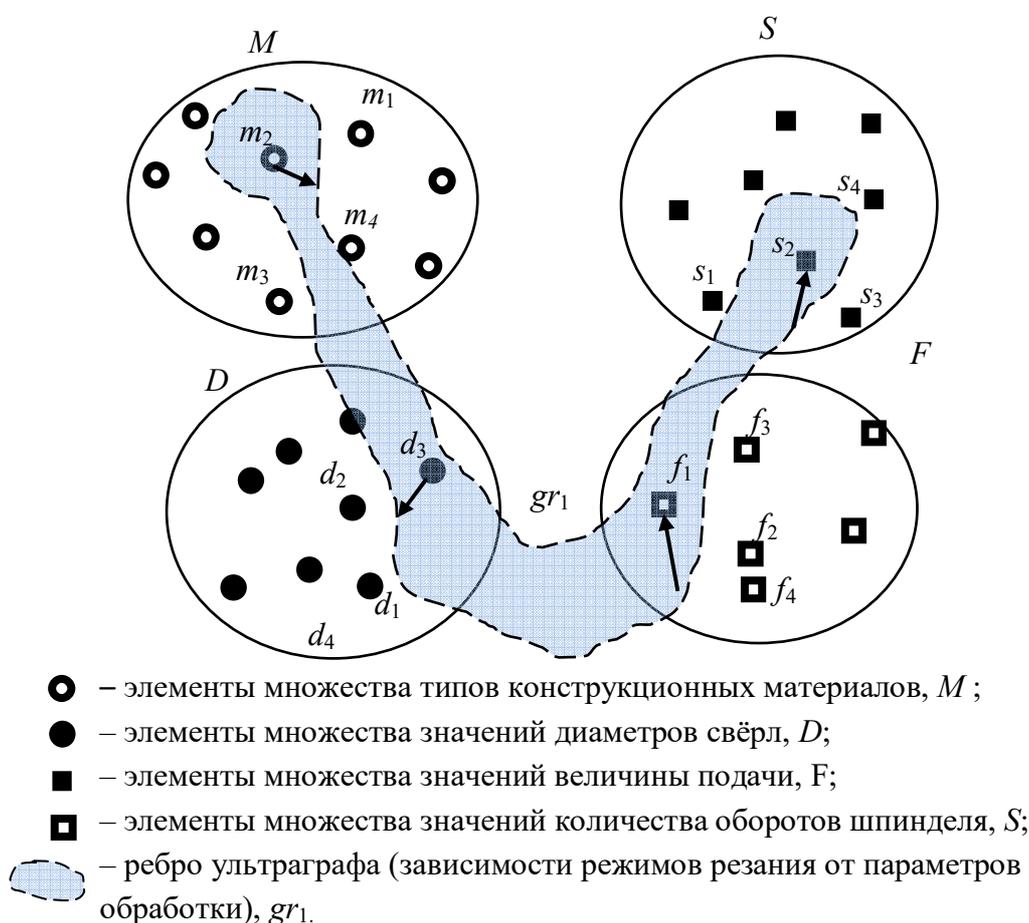


Рис. 1. Графическая иллюстрация информационной модели  $IM$

Ребро  $gr_1(Y_1)$  ультраграфа  $G$  имеет множество вешин  $Y_1 = \{m_2, d_3, f_1, s_2\}$ , в котором  $m_2, d_3$  – вершины истоки,  $f_1, s_2$  – вершины стоки. Например, если  $m_2, d_3, f_1, s_2$  ( $m_2$  – алюминиевый сплав,  $d_3$  – диаметр сверла 15 мм), то,  $f_1$  – 30 мм/мин и  $s_2$  – 750 об/мин.

Реализацию описанной информационной модели предполагается осуществить в редакторе онтологий Protégé.

Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Татаринцев, И. В. Автоматизированная система расчета режимов резания при токарной обработке деталей из стали / И. В. Татаринцев, Н. В. Бондаренко, М. В. Соколов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы IX Международной научно-практической конференции, Тамбов, 24–25 октября 2023 года. Том Выпуск 9. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2023. – С. 112-116. – EDN CMNNRT.
3. Алтунин, К. А. Разработка информационно-логической модели выбора параметров процесса резания для токарной обработки / К. А. Алтунин, М. В. Соколов // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : Материалы VI Международной научно-практической конференции, Тамбов, 16–18 октября 2019 года. Том 2, Выпуск 6. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. – С. 106-110. – EDN FZMFYQ.
4. Минин, А. А. Применение алгоритма муравьиных колоний для создания технологических процессов обработки резанием / А. А. Минин, В. А. Немтинов // Инженерные технологии. – 2023. – № 3(3). – С. 31-36. – EDN LAMZQA.

УДК 621.81.09

**Пачин А.В.<sup>1</sup>, Соколов М.В.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: sanek\_pro05@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: msok68@mail.ru

**СОЗДАНИЕ БАЗ ДАННЫХ И ИХ АНАЛИЗ ДЛЯ СИСТЕМЫ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСХОДОВ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЕКОРА МЕБЕЛИ**

**Pachin A.V.<sup>1</sup>, Sokolov M.V.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: sanek\_pro05@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: msok68@mail.ru

**CREATION OF DATABASES AND THEIR ANALYSIS FOR A COST  
FORECASTING SYSTEM FOR MILLING FURNITURE DECOR ELEMENTS**

*Аннотация.* В данной статье рассматриваются базы данных в виде таблиц с информацией о материалах, режущем инструменте и фигурных фрезах. Произведён анализ на производстве одной из мебельных фабрик.

*Ключевые слова:* базы данных, материалы, фрезерование, инструмент.

*Abstract.* This article discusses databases in the form of tables with information about materials, cutting tools, and shaped cutters. The analysis was conducted at a furniture factory.

*Keywords:* databases, materials, milling, tool.

Автоматизация расчетов стоимости деревообработки крайне актуальна из-за постоянного роста цен на материалы и инструменты. Ручные расчеты часто приводят к финансовым ошибкам и потере конкурентоспособности. Современное производство требует мгновенной и точной калькуляции, особенно для нестандартных заказов [1]. Такая программа становится ключевым инструментом для повышения рентабельности и эффективности бизнеса [2].

Для создания программы расчёта стоимости фрезерования нам потребуется несколько баз данных. Это база данных для материалов и база данных для инструмента[2]. В них используются самые актуальные и востребованные материалы и инструменты. В таблице 1 представлена информация о таких материалах как МДФ, ЛМДФ, фанера, ДСП, ЛДСП, ДВП, ХДФ, клееный брус, массив дуба.

Таблица 1. База данных для материалов

Материал	МДФ	ЛМДФ	Фанера	ДСП	ЛДСП	ДВП	ХДФ	Клееный брус	Массив дуба
Плотность, кг/м	750	700	650	650	620	850	850	500	700
Стоимость	28000	45000	35000	18000	25000	50000	35000	40000	85000
Коэф. обр-тки	1.1	1.2	1.5	1.4	1.7	0.9	0.9	1.3	1.4
Рек. скорость подачи м/мин.	6.0	5.5	5.0	4.5	5.0	4.0	6.5	5.5	4.0
Стоимость инструмента %	100	90	80	60	70	50	110	95	65
Пост обработка	Низкая	Низкая	Средняя	Низкая	Средняя	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая

Данный формат базы данных позволяет системе не просто хранить данные, а индивидуально подбирать параметры для точного расчёта себестоимости каждого заказа. Проведем анализ материалов с мебельного производства:

1. МДФ - базовый материал. Все коэффициенты (время обработки, износ) отталкиваются от него.

2. ЛМДФ - учёт снижения скорости для предотвращения сколов ламинации и её дополнительной стоимости.

3. Фанера - повышенное внимание к качеству кромки и возможность смолы налипать на инструмент

4. ДСП/ЛДСП - самые высокие затраты на абразивный износ инструмента и борьбу с пылью. Для ЛДСП - строгий контроль на сколы.

5. ДВП (оргалит) - экстремальный износ фрез. Без точного учёта этого параметра работа с ДВП будет убыточной.

6. ХДФ - эффективный материал, несмотря на цену. Высокая скорость обработки и низкие затраты на постобработку компенсируют стоимость материала.

7. Клееный брус - стабильный массив. Коэффициент обработки лучше, чем у цельного дуба, за счёт отсутствия внутренних напряжений.

8. Массив дуба - учёт твёрдости и обязательной ручной шлифовки после фрезеровки.

Таблица 2.База данных для материалов

Инструмент	Фреза 4мм	Фреза 8мм	Фреза 12мм	Фреза 22мм	Фреза 36мм	Фреза 40мм	Фреза V-90°	Фреза V-120°	Фреза 12-R	Фреза R-0.5 mm
Тип обработки	Чистовая, 3D	Чистовая	Глубокие пазы	Черновая/чистовая	Чистовая	Черновая/чистовая	Пазы Профиль	Гравировка	Чистовая	Гравировка
Стоимость фрезы, руб	2 500	5 500	4 500	7 000	18 000	9 000	3000	3200	5000	1800
Ресурс , м	600	1000	3000	1500	800	1500	900	950	1100	200
Кол-во заточек	2	4	5	5	3	6	3	3	4	0
Макс. подача, м/мин	3	4	6	8	2.5	8	2.5	3	4	1.5

1. Фреза 4мм (сфера) Низкая скорость подачи и малый шаг увеличивают время обработки для больших объемов. Высокая стоимость метра пробега. Применение: мелкие узоры.

2. Фреза 12мм - основной инструмент для 3D-декора. Оптимальное соотношение скорости и качества. Самый частый выбор для основного объема. Применение: основной рельеф, раскрой материала.

3. Фреза 22мм и 40мм используются для черновой обработки (загрузка заготовки) или для создания больших плоскостей. Низкая стоимость метра пробега. Применение: быстрая выборка фона под барельеф, выравнивание плоскости.

4. Фреза V-90° и V-120° Высокая стоимость метра пробега и низкая скорость подачи. Время обработки гравировки считается отдельно от 3D-моделирования. Угол 120° дает более острую и четкую гравировку. Применение: контурные рисунки, надписи, вензеля.

5. Фреза 12-R (радиусная) для калькуляции: Специализированный инструмент. Если в декоре есть скругленные кромки (галтели), эта фреза незаменима и ее износ должен быть учтен. Применение: филенчатые элементы, декоративные фаски, скругления на молдингах.

6. Фреза 8мм (спиральная) идеальна для глубокого 3D-рельефа. Спираль эффективно отводит стружку. Более высокая стоимость метра пробега, чем у 12-й сферы, но лучшее качество при большой глубине.

7. Фреза 36 мм (фигурная) самая дорогая в эксплуатации используется для создания готового профиля за один проход. Высокая стоимость фрезы и заточки низкий ресурс из-за сложной геометрии. Система должна обязательно учитывать ее себестоимость погонного метра.

8. Фреза R-0.5mm (гравировальная) Эксплуатационные затраты выше всех. Очень низкий ресурс и скорость подачи. Применяется на финальном этапе для тончайших деталей. Система должна рассчитывать стоимость ее износа даже для небольших длин пробега (например, 5 метров гравировки уже обойдутся в 45 руб.).

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение [Электронный ресурс, мультимедиа]: учебное пособие / М.Н. Краснянский, В.Г. Мокрозуб, В.А. Немтинов, М.В. Соколов и др. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023 – 267 с.

2. Пачин А. В. Расходы при фрезеровании элементов декора мебели / А.В. Пачин, М. В. Соколов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития [Электронный ресурс]: сборник научных статей молодых ученых, аспирантов и студентов / ФГБОУ ВО «ТГТУ». – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – Вып. XVI. – С. 66-68.

УДК 629.3.083

**Юмашев И.А.<sup>1</sup>, Немтинов В.А.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: Ilya20142003@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**ПРОВЕДЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ  
И РЕМОНТА ЭНДУРО-МОТОТЕХНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ**

**Yumashev I.A.<sup>1</sup>, Nemtinov V.A.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: Ilya20142003@gmail.com

<sup>2</sup>e-mail: nemtinov.va@yandex.ru

**MAINTENANCE AND REPAIR OF ENDURO MOTORCYCLES USING  
SOFTWARE**

*Аннотация.* В статье рассматривается подход к управлению техническим обслуживанием и ремонтом эндуро-мотоциклов, базирующийся на использовании теории построения экспертных систем. Поставлена и решена задача оптимального выбора мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта сложной конструктивной техники с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Рассмотрены вопросы построения информационно-логической модели поддержки принятия решений при его проведении, позволяющей в зависимости от текущего состояния узлов техники и технических условий изготовления деталей найти оптимальный вариант проведения технического обслуживания и наладки ровной работы мотоцикла в целом.

*Ключевые слова:* мототехника; эндуро; информационно-логическая модель; принятие решений; техническое обслуживание и ремонт.

*Abstract.* This article examines an approach to managing the maintenance and repair of enduro motorcycles based on expert system theory. The problem of optimally selecting maintenance and repair measures for complex internal combustion engine vehicles is posed and solved. The article explores the development of an information-logical model to support decision-making during maintenance and repair, allowing for the optimal maintenance and overall motorcycle operation to be determined based on the current condition of the vehicle components and the manufacturing specifications of the components.

*Keywords:* motorcycles; enduro; information-logical model; decision-making; maintenance and repair.

Современная эндуро-мототехника представляет собой сложный комплекс инженерных систем, где механические компоненты тесно интегрированы с

электронными блоками управления. В этих условиях традиционные методы обслуживания, основанные преимущественно на опыте механика, уже не способны обеспечить тот уровень точности, эффективности и прогнозируемости, который требуют как профессиональные сервисные центры, так и продвинутые частные владельцы. Решением этой задачи является активное внедрение специализированного программного обеспечения в процессы технического обслуживания и ремонта.

Использование цифровых инструментов позволяет совершить качественный скачок — перейти от реактивного ремонта «по факту поломки» к проактивному обслуживанию, основанному на данных диагностических систем. Такой подход становится ключевым конкурентным преимуществом, открывая возможности для тонкой настройки двигателя, анализа параметров в реальном времени, ведения цифровой истории обслуживания и точной калибровки всех систем мотоцикла. В данной статье рассматривается, как комплексное применение программных средств не только помогает быстро и точно локализовать неисправности, но и позволяет значительно повысить надежность, производительность и долговечность эндуро-мототехники, сокращая при этом общие затраты на её содержание [1].

#### **Системы технического обслуживания эндуро-мототехники.**

Техническое обслуживание мотоциклов включает в себя совокупность организационных и технических мероприятий, обеспечивающих поддержание их выходных параметров на заданном уровне в течение всего периода эксплуатации; осмотр и контроль технического состояния мотора и системы охлаждения: чистку, замену смазочно-охлаждающей жидкости, промывку и смазывание механизмов ходовой части и элементов системы управления; замену износившихся деталей, узлов механизмов и вышедших из строя элементов; проверку гидро- и электроприборов. В процессе эксплуатации двухколесного транспорта характерно ухудшение технических параметров в процессе эксплуатации, что выражается в естественном изменении геометрии, то есть детали, подвергаясь механическим и эрозионным воздействиям, в течение времени меняются в размерах и деформируются. Это, безусловно, сказывается на работе мотоцикла в целом и приводит к его поломке.

Причины аварий и поломок эндуро-мототехники:

##### 1) Конструктивные недостатки:

- конструкции узлов и их крепления, а также системы смазки; недостаточная жесткость и виброустойчивость; отсутствие предохранительных устройств и т.д.;
- конструкции деталей (неправильное назначение допусков, режимов термообработки, размеров и геометрической формы и т.д.);

##### 2) Дефекты изготовления металла (дефекты качества материала, литья и заготовок) и сборки мотоцикла (некачественные пригонка сопрягаемых деталей; утечка смазочных масел; проверка допустимых зазоров и т.д.);

##### 3) Некачественный уход:

- содержание техники в грязном состоянии (попадание влаги, пыли и стружки между трущимися деталями );

–отсутствие или некачественная смазка (отсутствие масла в двигателе и коробке передач; неисправность насоса или его привода; засоренность маслопровода; применение загрязненного масла или масла несоответствующей вязкости);

4) Неправильная наладка:

–некачественная наладка и регулировка (неверная натяжка цепи привода, неправильно отрегулированные клапана).

### **Задача оптимального выбора мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта эндуро-мототехники**

Для поиска оптимального варианта перечня мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта мотоцикла, удовлетворяющих нормативным требованиям, разработана информационно-логическая модель поддержки принятия решений, включающая в себя множество продукционных правил [2, 3].

В качестве примера приведем ряд правил, с помощью которых можно сформировать перечень мероприятий при техническом обслуживании и ремонте. Продукционные правила, входящие в состав модели, построены по типу:

*если ... (условия выполняются), то ... (реализация следствия).*

В настоящее время база содержит более 150 правил, конкретный вид которых рассмотрен применительно к эндуро-мототехнике, в частности мотоциклу BSE T4 (рис. 1.). Правила собраны экспертами и механиками, непосредственно работающие с данным видом техники:

а) *правила выбора мероприятий, если мотоцикл BSE T4 не заводится :*

1) если «напряжение на аккумуляторе ниже нормы», то «не рабочий АКБ»=«проверка жизнеспособности аккумулятора диагностикой АКБ»;

2) если «напряжение на аккумуляторе ниже нормы», то «разряжен АКБ»=«зарядка АКБ»;

3) если «отсутствует бензин в поплавковой камере», то «проверка бензина в бензобаке»=«налить бензин в бензобак»;

4) если «отсутствует бензин в поплавковой камере», то «проверка проходимости бензоканала»=«замена бензошлангов»;

5) если «отсутствует бензин в поплавковой камере», то «проверка работы бензокрана»=«замена бензокрана»;

6) если «отсутствует бензин в поплавковой камере», то «проверка бензинового фильтра»=«замена бензофильтра»;

7) если «отсутствует бензин в поплавковой камере», то «проверка иголки поплавковой камеры»=«чистка карбюратора»;

8) если «отсутствует бензин в поплавковой камере», то «проверка иголки поплавковой камеры»=«замена иголки поплавковой камеры»;

9) если «отсутствует искра зажигания», то «проверка работы свечи зажигания»=«замена свечи зажигания»;

10) если «отсутствует искра зажигания», то «проверка работы свечи зажигания»=«чистка свечи зажигания»;

- 11) если «отсутствует искра зажигания» , то «проверка бронипровода»=«замена бронипровода»;
- 12) если «отсутствует искра зажигания», то «проверка работы катушки зажигания»=«замена катушки зажигания»;
- 13) если «отсутствует искра зажигания», то «проверка отсутствия короткого замыкание на кнопке свич»=«ремонт кнопки свич »;
- 14) если «отсутствует искра зажигания», то «проверка отсутствия короткого замыкание на кнопке свич»=«ремонт контактной фишки кнопки свич»;
- 15) если «отсутствует искра зажигания», то «проверка отсутствия короткого замыкание на кнопке свич»=«замена кнопки свич»;
- 16) если «не работает стартер», то «проверка кнопки зажигания»=«замена кнопки зажигания»;
- 17) если «не работает стартер», то «проверка кнопки зажигания»=«ремонт кнопки зажигания»;
- 18) если «не работает стартер», то «проверка кнопки зажигания»=«ремонт контактной фишки кнопки зажигания»;
- 19) если «не работает стартер», то «проверка питания стартера»=«чистка контактов стартера и силовых проводов»;
- 20) если «не работает стартер», то «поломка стартера»=«ремонт стартера»;
- 21) если «не работает стартер», то «поломка стартера»=«замена стартера »;
- ...



Рис. 1. Общий вид эндуро-мотоцикла BSE T4

Информация о характеристиках каждого мероприятия приведена в табл. 1. В результате реализации модели поддержки принятия решений по выбору оптимального варианта мероприятий технического обслуживания и ремонта эндуро-мотоциклов осуществляется формирование множество мероприятий, обладающих разной эффективностью. В настоящее время размерность множества сформированных

мероприятий не превышает тысячи, поэтому поиск оптимального варианта осуществляется методом полного их перебора.

Таблица 1. Фрагмент базы характеристик мероприятий при проведении технического обслуживания и ремонта эндуро-мототехники

Номер правила	Технологичность (баллы от 1 до 10)	Ориентировочная стоимость мероприятия, руб.	Безопасность замены (баллы от 1 до 10, где 10 – полная безопасность, 1 – серьезная травма рабочего)
...	...	...	...
4	3	500	5
5	3	600	5
6	4	100	4
7	8	3500	6
8	8	1500	6
9	4	700	8
10	7	300	4
11	3	1500	8
12	5	3000	9
...	...	...	...

Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

2. Мамедова, И. А. Информационная поддержка принятия решений при обслуживании и ремонте оборудования тепловых пунктов сетей сельских поселений / И. А. Мамедова, Р. И. Мамедов, В. А. Немтинов // Цифровизация агропромышленного комплекса : Сборник научных статей III Международной научно-практической конференции, Тамбов, 25–27 октября 2022 года. Том 1. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2022. – С. 38-41. – EDN DLWMLU.

3. Информационная поддержка принятия решений при проведении технологического обслуживания токарных станков / В. А. Немтинов, В. Ю. Бобылев, Ю. В. Немтинова, А. Б. Борисенко // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 220-229. – DOI 10.17277/vestnik.2020.02.pp.220-229. – EDN WUOUIS.

УДК 004.424

**Шубин Я.С.<sup>1</sup>, Глебов. А.О.<sup>2</sup>**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

<sup>1</sup>e-mail: yarr84@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: glebov.alex@inbox.ru

### **ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ-ШАБЛОНА ПРИ ГРАВИРОВАНИИ НА 3-Х ОСЕВОМ ФРЕЗЕРНОМ СТАНКЕ С ЧПУ**

**Shubin Y.S.<sup>1</sup>, Glebov A.O.<sup>2</sup>**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

<sup>1</sup>e-mail: yarr84@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: glebov.alex@inbox.ru

### **USING A CONTROL PROGRAM-TEMPLATE FOR ENGRAVING ON A 3-AXIS CNC MILLING MACHINE**

*Аннотация.* В работе описывается пример использования управляющей программы-шаблона для станков с числовым программным управлением при решении конкретной задачи гравирования порядковых номеров на изделии.

*Ключевые слова:* станки с ЧПУ, управляющая программа, программа-шаблон, интенсификация, FANUC.

*Abstract.* The article describes an example of the use of a management program-template for machines with numerical program control when solving a specific task of engraving sequence numbers on products.

*Keywords:* CNC machines, control program, program-template, intensification, FANUC.

Руководствуясь текущей обстановкой в мире, ответами на вызовы современности, Президент, Правительство, Государственная Дума, ставят задачи укрепления экономического суверенитета. Достижения прикладных исследований в науке и передовые технологии играют все более важную роль. Решение реальных проблем в медицине, оборонных технологиях, бизнесе требует применения научных знаний и методов.

Развитие промышленного производства, его интенсификация, связана с применением технологий числового программного управления, ERP и MES, искусственного интеллекта и роботизации. Производства становятся все более «умными» [1].

Но, «чтобы пробиваться вперед, надо не копировать, а творить» [2]. Один из таких примеров творчества – применение программы-шаблона собственной разработки при

гравировании на 3-х осевом фрезерном станке с ЧПУ, позволяющее серьезно сократить время производства изделия.

Производственная задача заключалась в гравировании порядкового номера на последнем этапе изготовления детали. Специализированным оборудованием для гравирования малое машиностроительное предприятие, для которого решалась данная задача, не обладает. Первоначальное решение – отдать изделие на кооперацию. Найдены несколько подрядчиков, но никто из них не мог обеспечить выработку более 100 шт. в смену, что сильно отличалось от первоначальных расчетов и грозило срывом сроков отгрузки. Окно в производственном графике 3-х осевого фрезерного станка с ЧПУ могло помочь, но не устраняло проблему сроков полностью при традиционном подходе. Генерация отдельных программ на десятки тысяч изделий – трудоемкая и затратная по времени задача. Для оператора станка тоже возникали трудности: темп производства тормозили постоянные загрузки новой программы для следующей детали и навигация между ними.

Принято решение разработать программу-шаблон с помощью средств макропрограммирования системы управления FANUC. Одна программа для всех изделий вместо тысяч для каждого. Устранялось несколько проблем одновременно:

- 1) технолог-программист освобождается от многодневной рутины;
- 2) оператор не осуществляет загрузку и выбор тысяч программ.

При разработке были использованы такие инструменты, как ГеММа-3D (см. рис. 1) и CIMCO Edit 8. Выбор ГеММа-3D обусловлен поддержкой большого количества российских шрифтов в модуле гравирования.

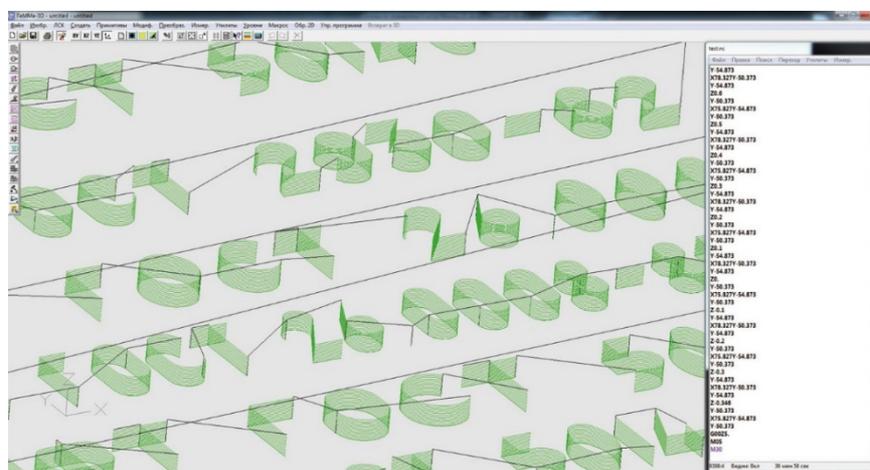


Рис. 1. Интерфейс ГеММа-3D

Пользуясь этим многообразием, нетрудно запрограммировать гравирование цифр от «0» до «9» требуемых размеров и с нужной глубиной погружения инструмента. Получившиеся отрывки G-кода (назовем их программными текстурами цифр) помещены в основную макропрограмму и обособлены адресами от N100 до N1000 вначале каждого и M99 в конце для осуществления вызова.

Следующим шагом стала разработка программы-шаблона в среде CIMCO Edit 8. Система управления станков с ЧПУ FANUC, как и большинство современных

производителей, поддерживает средства макропрограммирования. В их числе локальные и глобальные переменные, доступ к значениям машинных параметров, вычислительные циклы, арифметические и логические операции [3].

Функционирование основной программы осуществляется следующим образом:

- производится чтение машинного параметра #3901 (счетчик деталей), где хранится внесенный наладчиком начальный номер в партии;
- полученное число по известному алгоритму (деление на 10 и взятие остатка) разбивается на цифры [4];
- после получения очередной цифры, осуществляется вызов соответствующей «программной текстуры», вычисление положения на детали и гравирование;
- если все цифры номера перебрали, то переходим на конец программы;
- параметр #3901 (счетчик деталей) увеличивается на 1 автоматически по завершении программы и, соответственно, следующая установленная и произведенная деталь будет иметь следующий порядковый номер.

Таким образом, имеем управляющую программу, автоматически генерирующую результат на выходе. Время, затраченное на разработку – 2 ч. 45 мин. Оператор лишен трудностей в работе с тысячами управляющих программ и возможности ошибиться. В смену производилось от 622 до 650 деталей, что позволило предприятию отказаться от кооперации.

При традиционном подходе к разработке действия программиста-технолога свелись бы к рутинным в САМ-системе: изменение в модели; создание операции; постпроцессирование и вывод управляющей программы.

Эти действия занимают примерно 95 секунд на одну программу. Т.е. на разработку только 1000 программ необходимо более 26 часов. Как уже было сказано ранее, производственным ритм сильно зависел бы от загрузки тысяч управляющих программ и выбора нужной. Рассмотренный пример использования управляющих программ-шаблонов наиболее наглядно демонстрирует перспективность их применения.

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.
2. Эмерсон Г. Двенадцать принципов производительности : [Пер. с англ.] / Г. Эмерсон. – 2-е изд. – Москва : Экономика, 1992. – 224 с.
3. Fanuc series 0i - ModelD. Общее для системы токарного станка и системы многоцелевого станка руководство по эксплуатации. [Тех. документация] : В-64304RU\_02-0iD. – 183 с.
4. Кнут Д. Искусство программирования. Т. 4, вып. 3: генерация всех сочетаний и разбиений / Д. Кнут : пер. с англ. – М. : ООО «И.Д. Вильямс», 2007 – 208 с.

УДК 4.009

**Бирюлина Я.А., Мокрозуб В.Г.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: biryulina-mar@yandex.ru

## АЛГОРИТМ ПЕРЕВОДА ТЕКСТА В ЧЕРТЕЖАХ

**Biryulina Ya.A., Mokrozub V.G.**

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

e-mail: mokrozubv@yandex.ru

## THE ALGORITHM FOR TRANSLATING TEXT IN DRAWINGS

*Аннотация.* Описан алгоритм выбора и перевода текста в чертежах с использованием формата dxf.

*Ключевые слова:* чертежи, перевод, формат dxf.

*Abstract.* An algorithm for selecting and translating text in drawings using the dxf format is described.

*Keywords:* drawings, translation, and the dxf format.

В условиях импортозамещения использование отечественных графических редакторов, таких как Компас, Т-Flex и др. [1] приобретает особую актуальность. Не менее важно иметь возможность переводить тексты в чертежах на другие языки. Одним из способов распознавания текстовых данных, является представление чертежей в формате dxf с последующей их обработкой. Формат dxf – текстовый формат, который легко читается Python командой `readline`, например:

```
fin=open('Чертеж.DXF','r+', encoding='UTF-8')
line = fin.readline()
```

Структура формата dxf такова, что содержимое команд TEXT или MTEXT находится после слов «TEXT» и «MTEXT» соответственно. Непосредственно значение текста находится после строки с содержимым «1». Ниже приведен фрагмент dxf-файла.

```
TEXT
5
2C0
...
1
Болт, гайка 100
```

Нас рис. 1. приведена схема алгоритма перевода текста в чертежах. Исходный файл `fin`, результат файл `fout`. Переменная `flag` позволяет отследить начало команды «TEXT» или «MTEXT» и найти строку с содержимым текста.

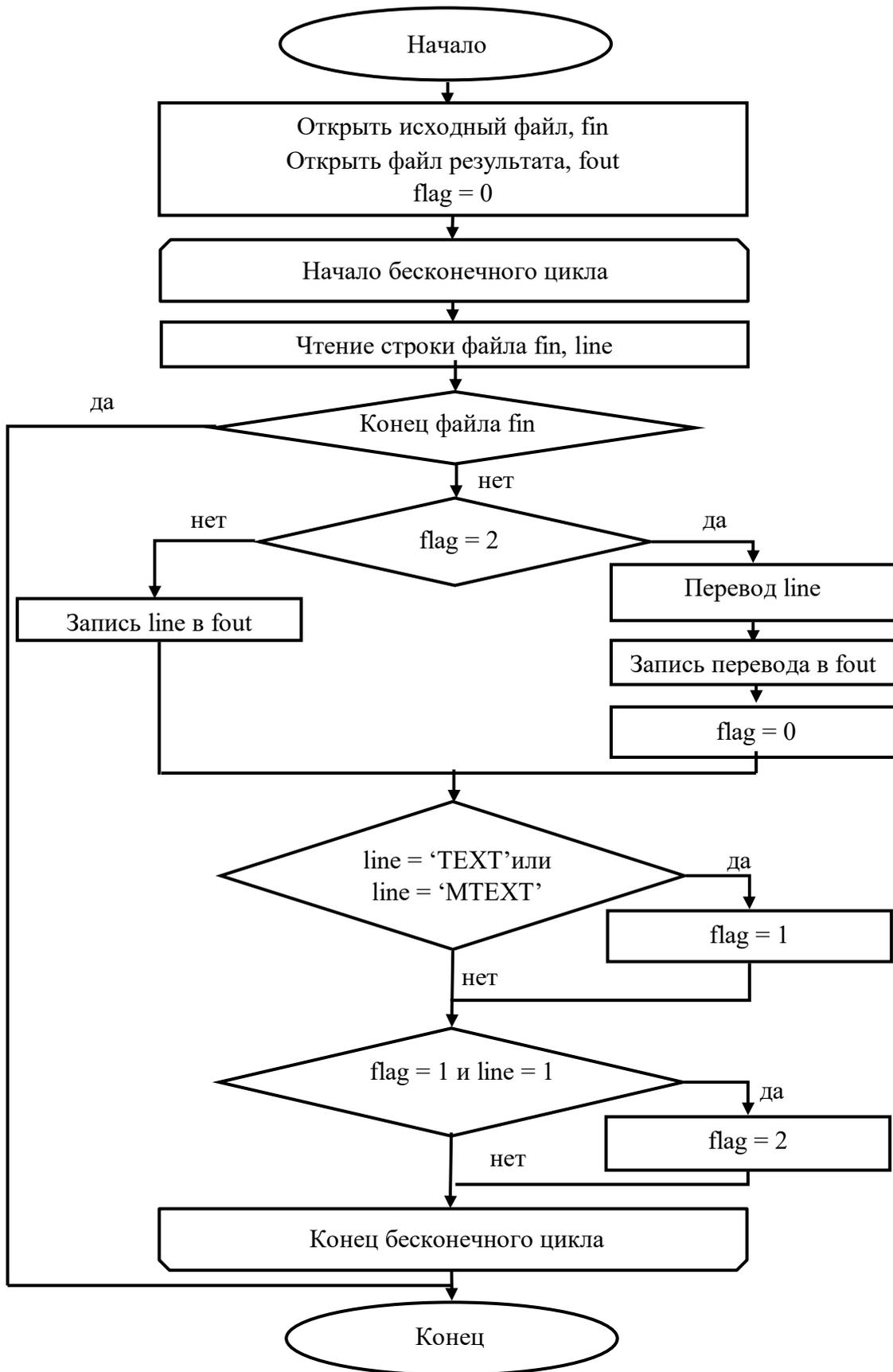


Рис. 1. Схема алгоритма перевода текста в чертежах

Если прочитана строка «ТЕХТ» или «МТЕХТ» flag принимает значение 1. Если flag=1 и прочитанная строка 1, то flag принимает значение 2, и последующую строку надо переводить.

Указанный алгоритм используется при разработке системы автоматизированного проектирования химического оборудования [2-4].

#### Список использованных источников

1. Цифровое машиностроение / М. Н. Краснянский, В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов [и др.]. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2023. – 266 с. – ISBN 978-5-8265-2608-8.

2. Mokrozub, V. G. Procedural Model for Designing Multiproduct Chemical Plants / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. V. Mokrozub // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, No. 5-6. – P. 326-331. – DOI 10.1007/s10556-017-0342-6. – EDN XNSPGA.

3. Система поддержки принятия решений при проектировании абсорбера для очистки вентиляционных выбросов гальванических производств / А. В. Крылов, М. А. Матрохин, К. В. Немтинов, В. А. Немтинов // Компьютерная интеграция производства и ИПИИ-технологии : Сборник материалов X Всероссийской конференции, Оренбург, 18–19 ноября 2021 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 137-142. – EDN UMFPXE.

4. Мокрозуб, В. Г. Функциональная модель проектирования химико-технологических систем / В. Г. Мокрозуб, А. А. М. Альсаиди, Г. А. Дьяков // Инновационные материалы и технологии - 2024 : материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Минск, 31 марта – 04 2024 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2024. – С. 372-374. – EDN ITEXUP.

УДК 004.62

**Обухов А.Д., Волков А.А., Дудин М.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: obuhov.art@gmail.com

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОДУЛЕЙ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ  
СИСТЕМЫ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ**

**Obukhov A.D., Volkov A.A., Dudin M. A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: obuhov.art@gmail.com

**DEVELOPMENT OF ALGORITHMIC AND SOFTWARE MODULES FOR  
DATA COLLECTION AND PROCESSING FOR THE MUSCULOSKELETAL  
REHABILITATION SYSTEM**

*Аннотация.* В работе рассматривается созданный модуль сбора, обработки, сохранения и визуализации данных биологической обратной связи для последующего их использования в системе опорно-двигательной реабилитации. Описан интерфейс модуля, его функциональные элементы, их назначение и возможности.

*Ключевые слова:* опорно-двигательная реабилитация, биологическая обратная связь, сбор данных.

*Abstract.* This paper examines a module developed for collecting, processing, storing, and visualizing biofeedback data for subsequent use in a musculoskeletal rehabilitation system. The module's interface, functional elements, and their purpose and capabilities are described.

*Keywords:* musculoskeletal rehabilitation, biofeedback, data collection.

Важной составляющей процесса опорно-двигательной реабилитации является модуль сбора и обработки данных для последующего формирования биологической обратной связи (БОС). Сбор данных – это важная составляющая любого комплекса опорно-двигательной реабилитации (ОДР), так как необходим их качественный анализ врачом и подготовки им процесса тренировок пациента для наилучшего восстановления функций мышечной системы. Биологическая обратная связь – это данные, собираемые непосредственно с человека, например, длина шага, время ходьбы и т. п. Часто данные БОС необходимы врачам для подготовки лечения, оценки качества прохождения конкретного лечения, анализа результатов и прогнозирования прогресса. Датчики (например, камера с интегрированным машинным зрением для отслеживания походки человека) должны считывать показания с пациента в реальном времени, а

система – опрашивать эти датчики. Чтобы собирать данные с помощью датчиков, необходимо интегрировать модуль считывания показаний БОС и их передачу для дальнейшего накопления и использования их врачом.

Разработанный модуль для записи данных с датчиков (Рекордер) работает по клиент-серверной схеме. Клиентская часть (приложение, запускаемое у пациента или в кабинете терапевта) отвечает за связь с датчиками и организацию тренинга (графический интерфейс, управление обратной связью), а серверная часть – за централизованное хранение и обработку данных, а также координацию сеансов. Коммуникация между клиентом и сервером построена по принципу открытой клиент-серверной архитектуры [1]. Таким образом комплекс масштабируем и поддерживает разные типы устройств.

В качестве серверной части используется модуль (Сервер), маршрутизирующий входящие потоки, тем самым направляя их указанному в сообщении модулю по стандартному протоколу. Таким образом, Сервер не выполняет никаких преобразований данных, а лишь отдает их по указанному в сообщении адресу Рекордера для их дальнейшего использования.

При запуске Рекордер открывается основное окно программы и начинается процедура поиска Сервера. После того, как был найден какой-либо Сервер, Рекордер подключается к нему. Основные функциональные элементы модуля Рекордер представлены на рисунке 1.

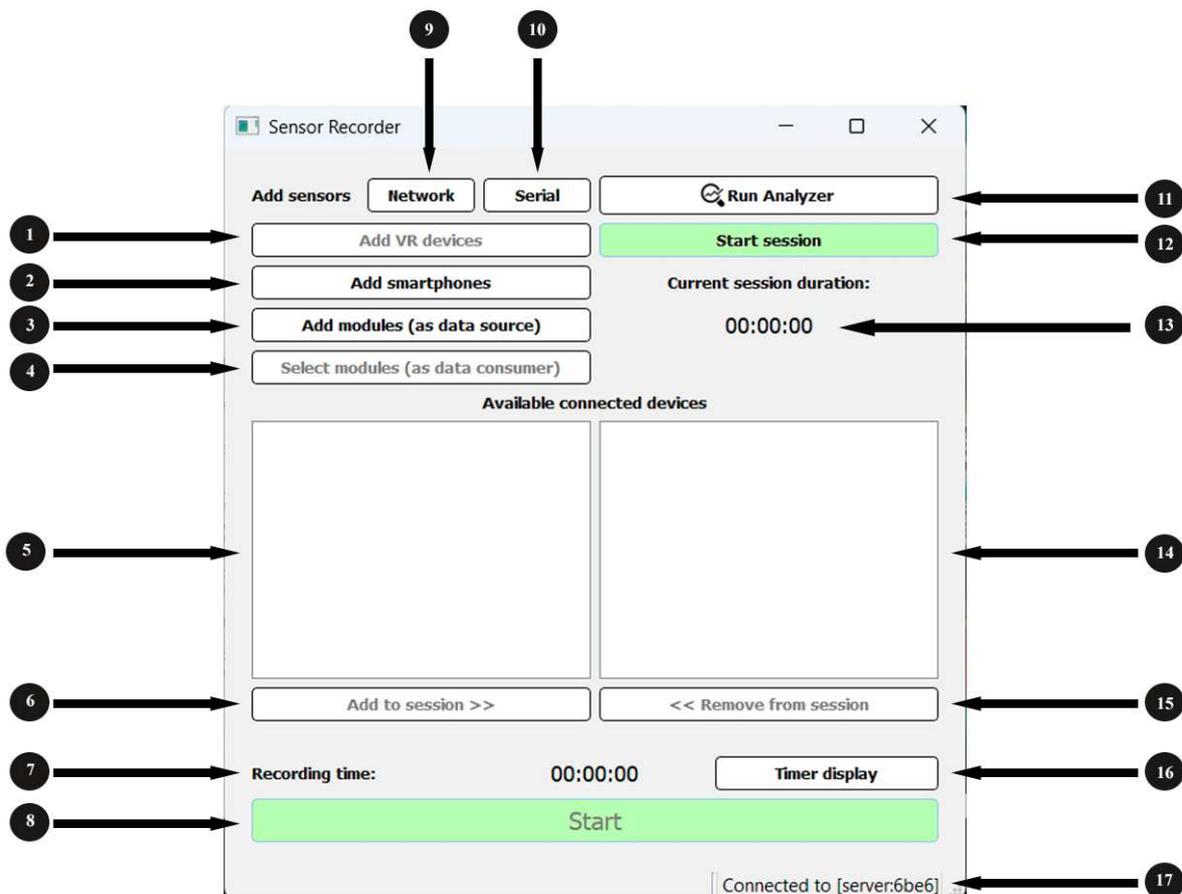


Рис. 1. Главное окно модуля сбора данных

Обозначения на рисунке 1:

1. Функция «Добавить VR устройство» – позволяет добавить VR-контроллеры и VR-трекеры, которые поддерживаются библиотекой OpenVR;
2. Функция «Добавить смартфон» – позволяет работать с датчиками инерциальной навигации на базе смартфона.
3. Функция «Добавить модуль (в качестве источника данных)» – добавляет модуль микросервисной платформы [3], как источник данных;
4. Выбрать модуль (в качестве потребителя данных) – добавляет модуль микросервисной платформы, как потребитель данных;
5. Список доступных для подключения в сессию устройств показывает все добавленные источники данных;
6. «Добавить в сессию» добавляет выделенное устройство в сессию для сохранения данных;
7. Время записи в текущей сессии отображает прошедшее время с последнего запуска записи данных;
8. «Старт/стоп записи в текущей сессии» начинает и заканчивает запись данных с подключенных источников в файл;
9. «Добавить сенсоры посредством беспроводной связи» – добавляет датчик, подключенный по беспроводной сети Wi-Fi;
10. «Добавить сенсоры посредством проводного соединения» – добавляет датчик, подключенный по проводной связи (с помощью USB-соединения);
11. «Запуск анализатора данных с устройств (сенсоров)» – открывает дополнительное окна для отображения данных с датчиков;
12. Стар/стоп сессии запускает и останавливает сессию;
13. «Время текущей сессии» – суммарное время работы с момента запуска текущей сессии;
14. «Список подключенных устройств для данной сессии» – отображает устройства, которые были добавлены, а затем подключены в сессию;
15. «Удалить из текущей сессии» удаляет выбранное устройство из текущей сессии;
16. Включение отдельного меню с таймером позволяет вывести таймер большего размера в отдельное окно;
17. Строка состояния Сервера отображает текущее состояние подключения к серверу.

Перед началом сеанса записи пользователю необходимо добавить все устройства и модули, которые планируется использовать для записи. При добавлении того или иного устройства и модуля будет открываться меню выбора доступных устройств. В данном меню можно выбрать необходимые устройства и добавить в список доступных. Устройства будут добавлены в список доступных и отражены в левом списке (доступные для подключения в сессию). Далее можно начинать сессию и добавлять в нее устройства. Для запуска записи в текущей активной сессии с подключенными и выбранными устройствами нужно нажать на зелёную кнопку «Start». После её нажатия запись будет запущена. Все записи внутри сессии записываются в папку «data», находящуюся в рабочем каталоге модуля Рекордер. Внутри папки «data» будут располагаться папки с датой и названием сессии.

Наиболее важными функциями модуля Рекордер являются соединение нужных устройств и запись данных с них, но нельзя не упомянуть и о таких функциях, как: отображение графиков в реальном времени в виде 2D или 3D (доступны только для некоторых видов датчиков), вывод информации об уровне заряда батареи устройств. Такие функции очень важны для отслеживания данных в реальном времени, а также для более ясного понимания цифр с датчиков. Если необходимо просмотреть графическое отображение уже записанных данных, то можно использовать окно Анализатор, которое позволяет просматривать записанные ранее данные из файла, выбрав необходимые столбцы (каналы).

При выборе одного из способов отображения графиков в реальном времени откроется окно, которое будет отображать непосредственно графики с устройств с возможностью настройки этих графиков. В данном окне можно настроить отображение графиков так, чтобы видеть данные только с выбранных устройств.

Таким образом, для решения задачи сбора, сохранения, визуализации данных был реализован специализированный модуль, который помогает решить проблему ручного сбора данных о пациенте и автоматизирует процедуру их сохранения для дальнейшего использования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№124032800018-5).*

#### Список использованных источников

1. Nazarova A. et al. Development of a control system for intermodular interaction in a virtual training complex //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2023. – Т. 2910. – №. 1. – С. 020163.
2. Volkov A. et al. Structural model of the microservice architecture of the control system for training complexes //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – Т. 2910. – №. 1.
3. Обухов, А. Д. Микросервисная архитектура виртуальных тренажерных комплексов / А. Д. Обухов, А. А. Волков, А. О. Назарова // Информатика и автоматизация. – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 1265-1289. – DOI 10.15622/ia.21.6.7.

**Секция**

**БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**



УДК 615.471

**Ушаков А.Ю.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: Aleksey-ushakov-68@yandex.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ ДЫХАНИЯ  
ЧЕЛОВЕКА: ОДНОКОМПАРТМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ С ВАЛИДАЦИЕЙ НА  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

**Ushakov A.Yu.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: Aleksey-ushakov-68@yandex.ru

**MATHEMATICAL MODELING OF HUMAN RESPIRATORY MECHANICS:  
SINGLE-COMPONENT MODEL WITH VALIDATION ON EXPERIMENTAL  
DATA**

*Аннотация.* В данной работе представлена математическая модель механики дыхания человека, основанная на однокомпарментной линейной модели легких. Модель описывает взаимосвязь между давлением в дыхательных путях, потоком воздуха и объемом легких с использованием трех ключевых параметров: сопротивления дыхательных путей ( $R$ ), растяжимости легких ( $C$ ) и инерции газового потока ( $L$ ). Целью исследования является верификация модели на синтезированных экспериментальных данных, имитирующих спокойное и форсированное дыхание. Проведен численный эксперимент с решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка.

*Ключевые слова:* математическая модель легких, механика дыхания, сопротивление дыхательных путей, растяжимость легких, обыкновенные дифференциальные уравнения.

*Abstract.* This paper presents a mathematical model of human respiratory mechanics based on a single-component linear model of the lungs. The model describes the relationship between airway pressure, air flow, and lung volume using three key parameters: airway resistance ( $R$ ), lung extensibility ( $C$ ), and gas flow inertia ( $L$ ). The aim of the study is to verify the model based on synthesized experimental data simulating calm and forced breathing. A numerical experiment is carried out with the solution of a system of ordinary differential equations by the Runge-Kutta method of the 4th order.

*Keywords:* mathematical model of the lungs, respiratory mechanics, airway resistance, lung extensibility, ordinary differential equations.

### *Введение*

Дыхательная система человека является сложной динамической системой, точное математическое описание которой необходимо для понимания патофизиологии различных заболеваний (ХОБЛ, астма, фиброз легких), разработки систем искусственной вентиляции легких (ИВЛ) и создания диагностических инструментов [1, 2]. Фундаментальные законы механики и гидродинамики позволяют создать редуцированные, но физически адекватные модели, описывающие основные респираторные паттерны.

Классическим подходом к моделированию механики дыхания является представление легких в виде эквивалентной электрической цепи [3]. В этой аналогии давление аналогично напряжению, поток воздуха – току, а физические свойства системы описываются пассивными элементами: резистором (сопротивление  $R$ ), конденсатором (растяжимость  $C$ ) и катушкой индуктивности (инерция газового потока  $L$ ). Наиболее распространенной является однокомпарментная модель "RLC", которая, несмотря на свою простоту, успешно описывает ключевые аспекты вентиляции [4].

Целью данного исследования является разработка и валидация однокомпарментной математической модели легких. В рамках работы решаются следующие задачи:

1. Формализация математической модели на основе уравнения движения газа.
2. Проведение вычислительного эксперимента с заданием физиологически достоверных параметров  $R$ ,  $C$ ,  $L$  и моделируемого давления.
3. Визуализация результатов в виде графиков объема, потока и давления во времени.
4. Анализ полученных данных и обсуждение адекватности модели.

### *Материалы и методы*

#### *Математическая модель*

Динамика дыхания в однокомпарментной модели описывается уравнением, связывающим трансреспираторное давление ( $P_{ao}$ ), приложенное к дыхательным путям, с потоком ( $Q$ ) и объемом легких ( $V$ ):

$$P_{ao}(t) = R \cdot Q(t) + L \cdot \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C} \cdot V(t) + P_0, \quad (1)$$

где:

$P_{ao}(t)$  – давление в проксимальных дыхательных путях;

$R$  – сопротивление дыхательных путей потоку газа;

$Q(t)$  – объемный поток воздуха;

$L$  – инерция газового потока дыхательной системы;

$V(t)$  – объем легких выше функциональной остаточной емкости (ФОЕ);

$C$  – растяжимость (комплаинс) легких;

$P_0$  – давление релаксации, принимаемое за ноль относительно ФОЕ.

Учитывая, что поток  $Q(t)$  является производной от объема  $V(t)$ , уравнение можно переписать как линейное неоднородное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка относительно  $V(t)$ :

$$L \cdot \frac{d^2V}{dt^2} + R \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{1}{C} \cdot V(t) = P_{ao}(t) - P_0. \quad (2)$$

Для численного решения данное уравнение удобно представить в виде системы ОДУ первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = Q \\ \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{L} (P_{ao}(t) - P_0 - R \cdot Q - \frac{1}{C} \cdot V) \end{cases} \quad (3)$$

#### *Параметры модели и входные данные*

Для имитации экспериментальных данных были выбраны параметры, характерные для здорового взрослого человека:

$$R = 2.0 \text{ см вод. ст.} \cdot \text{с/л};$$

$$C = 0.2 \text{ л/см вод. ст.};$$

$$L = 0.01 \text{ см вод. ст.} \cdot \text{с}^2/\text{л} \text{ (инерционный компонент обычно мал);}$$

$$P_0 = 0 \text{ см вод. ст.}$$

Моделируемое давление  $P_{ao}(t)$  задавалось в виде кусочно-синусоидальной функции для имитации дыхательного цикла (вдох-выдох) продолжительностью  $T = 4 \text{ с}$  (15 циклов в минуту):

$$P_{ao}(t) = \begin{cases} P_{max} \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{T_{insp}}\right), & \text{если } t_{cycle} \leq T_{in}, \\ 0, & \text{если } t_{cycle} > T_{in} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $t_{cycle}$  – время в пределах текущего цикла,  $T_{insp} = 1.6 \text{ с}$  – время вдоха,  $P_{max} = 10 \text{ см вод. ст.}$  – пиковое давление на вдохе. Для форсированного выдоха модель была модифицирована путем увеличения  $R$  до  $5.0 \text{ см вод. ст.} \cdot \text{с/л}$ .

#### *Численные методы*

Система ОДУ решалась численно с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка. Время интегрирования –  $20 \text{ с}$  (5 полных дыхательных циклов) с шагом  $0.01 \text{ с}$ . Начальные условия:  $V(0) = 0, Q(0) = 0$ .

#### *Результаты и обсуждение*

##### *Динамика дыхательных циклов в норме*

На рисунке 1 представлены результаты моделирования для условий спокойного дыхания. Графики демонстрируют установившийся периодический процесс после первого переходного цикла.

График А (Объем): Кривая объема легких  $V(t)$  имеет плавную синусоидальную форму. Амплитуда колебаний (дыхательный объем,  $TV$ ) составляет примерно  $1,0 \text{ л}$ , что соответствует физиологической норме ( $0,5-1,0 \text{ л}$ ). Объем возвращается к нулю (уровень ФОЕ) в конце каждого выдоха.

График В (Поток): Кривая потока  $Q(t)$  является производной от объема и опережает его по фазе. Пиковый поток на вдохе составляет примерно 1,2 л/с. Характерной особенностью является форма кривой выдоха: поток плавно снижается до нуля, что типично для пассивного выдоха у здорового индивида.

График С (Давление): Заданное моделируемое давление  $P_{ao}(t)$  имеет прямоугольно-синусоидальную форму.

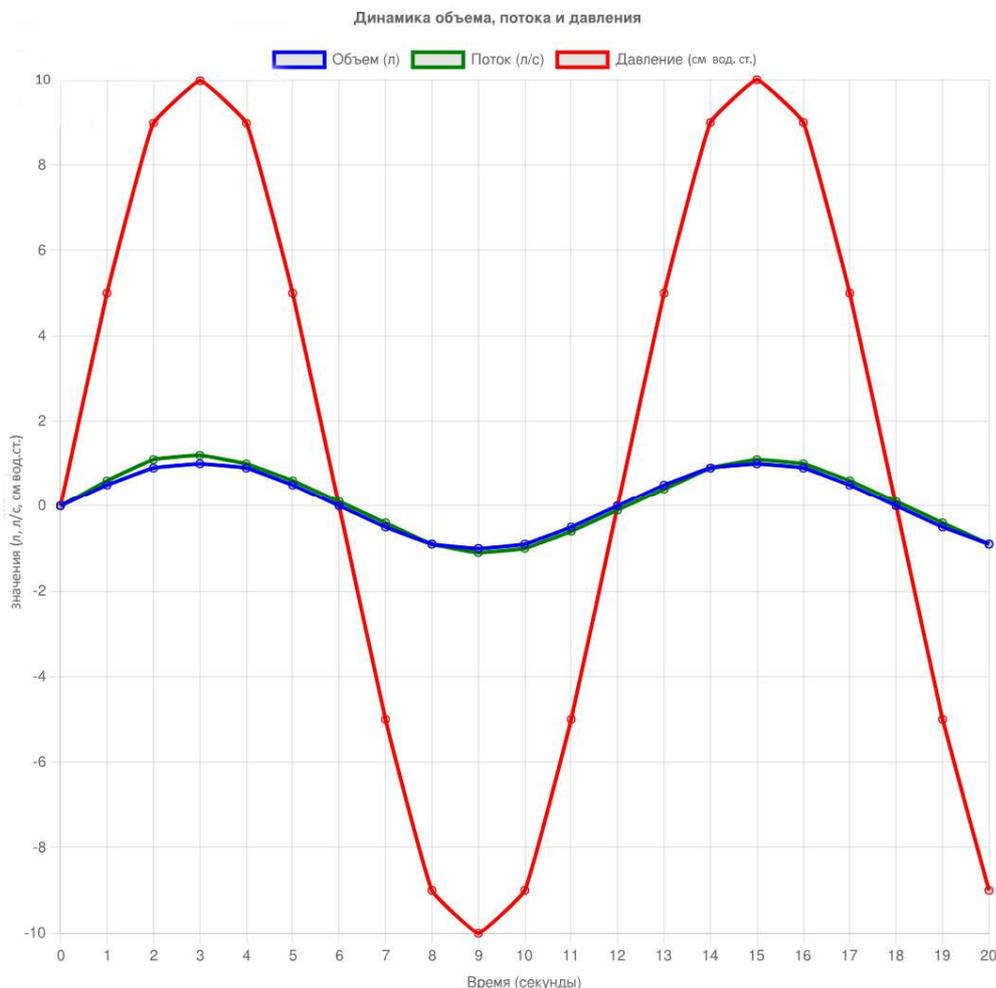


Рис.1. Динамика объема (А) – синяя кривая, потока (В) – зеленая кривая и давления (С) – красная кривая при спокойном дыхании.

### Заключение

В рамках данного исследования была успешно разработана и протестирована однокомпарментная математическая модель механики дыхания. Численный эксперимент показал, что даже простая линейная  $RLC$ -модель способна генерировать данные, качественно и количественно согласующиеся с фундаментальными физиологическими принципами. Модель адекватно воспроизводит дыхательный объем и форму кривых потока и объема при спокойном дыхании.

Основным ограничением модели является ее линейность и сосредоточенность параметров. Реальные легкие обладают нелинейными зависимостями растяжимости и сопротивления от объема и потока, а также являются распределенной системой.

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке многокомпарментных моделей, учитывающих региональные различия в механике легких, нелинейные эффекты и газообмен. Такие модели могут найти применение при настройке режимов ИВЛ, создании симуляторов для обучения медиков и в фундаментальных исследованиях респираторных заболеваний.

#### Список использованных источников

1. Bates, J. H. T. Lung Mechanics: An Inverse Modeling Approach. / Bates J. H. T. Lung. – New York: Cambridge University Press – 2009. – 238 с.
2. Grotberg, J. B. Respiratory fluid mechanics and transport processes / J. B. Grotberg // Annual Review of Biomedical Engineering – 2001, 421-457.
3. Macklem, P. T. Resistance of central and peripheral airways measured by a retrograde catheter. / P. T. Macklem P. T., J. Mead // Journal of Applied Physiology – 1967, 22(3), 395-401.
4. Lutchen, K. R. Optimal ventilation waveforms for estimating low-frequency respiratory impedance. / K. R. Lutchen, K. Yang, D. W. Kaczka, B. Suki // Journal of Applied Physiology – 1993, 75(1), 478-488.
5. Avanzolini, G. A new approach for tracking respiratory mechanical parameters in real-time. / G. Avanzolini, P. Barbini, A. Cappello, G. Cevenini // Annals of Biomedical Engineering – 1997, 25(1), 154-169.

УДК 004.02+004.9.

**Евстигнеева Е.П., Фролова Т.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: elizavetaevst44@gmail.com

## **КРИТЕРИИ ВЫБОРА И МЕТОД РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ОСНАЩЕНИЯ ОФТАЛЬМОЛОГИЧЕСКОГО КАБИНЕТА**

**Evstigneeva E.P., Frolova T.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: elizavetaevst44@gmail.com

## **SELECTION CRITERIA AND METHOD OF OPTIMIZING THE EQUIPMENT OF AN OPHTHALMOLOGIST'S OFFICE**

*Аннотация.* Статья рассматривает проблемы выбора оборудования для офтальмологических кабинетов, такие как многообразие моделей, отсутствие единых стандартов качества и высокая стоимость техники. Предлагаются два решения: индивидуальная настройка оборудования через веб-платформу и комплекты оборудования разного уровня оснащённости. Подчеркнута значимость модульных решений, обеспечивающих экономию средств путем поэтапного обновления компонентов.

*Ключевые слова:* оснащение кабинета, выбор оборудования, диагностика, офтальмология, надежность.

*Abstract.* This article examines the challenges of selecting equipment for ophthalmology offices, including the variety of models, the lack of uniform quality standards, and the high cost of equipment. Two solutions are proposed: customization of equipment via a web platform and equipment kits with varying levels of features. The importance of modular solutions, which provide cost savings through phased component upgrades, is emphasized.

*Keywords:* office equipment, equipment selection, diagnostics, ophthalmology, and reliability.

Организация современного офтальмологического кабинета невозможна без внедрения высокочувствительных и точных диагностических инструментов, однако сама процедура оснащения подобного помещения выходит далеко за рамки простого приобретения единичных образцов оборудования. Процесс подбора оборудования превращается в комплексную проблему, требующую глубокой аналитики и учёта целого ряда взаимосвязанных факторов: от специфических потребностей врача и профиля клиники до финансовых ограничений и стратегических целей учреждения [1,2].

Специалисты сталкиваются с несколькими серьезными проблемами при выборе оборудования:

1. Огромное разнообразие моделей и производителей на рынке.
2. Отсутствие единых стандартов качества и объективных критериев для сравнения оборудования.
3. Недостаточность объективной информации для грамотного анализа характеристик приборов.
4. Высокая стоимость большинства современных офтальмологических комплексов.

Найти оптимальный компромисс между ценой, качеством и функциональностью порой бывает сложно, так как неверный выбор оборудования может не только повлиять на долгосрочные финансовые затраты, но и негативно сказаться на точности диагностики, а значит, и на здоровье пациентов.

Для снижения неопределенности и ускорения процесса подбора оборудования предлагаются два подхода:

Индивидуальный подбор оборудования. Это подход для специалистов, предпочитающих самостоятельно формировать набор диагностических приборов, учитывая собственные предпочтения и индивидуальные потребности клиники. Мы разработали удобную систему фильтрации и сравнительного анализа, позволяющую мгновенно сравнивать модели по заданным критериям и наглядно демонстрировать их сильные и слабые стороны. Система помогает подбирать приборы, максимально соответствующие профессиональным целям врача, будь то углубленное исследование сосудов сетчатки или общее наблюдение за здоровьем глаз.

Комплексные готовые решения. Подходит для тех, кто желает сразу получить готовый набор оборудования, оптимизированный под базовые, средние или премиальные нужды клиники. Готовые комплекты разработаны на основе реальной статистики и рекомендаций специалистов, включают проверенные комбинации приборов, которые гарантированно будут эффективны в большинстве случаев и смогут обеспечить надежную диагностику без долгих поисков и сомнений.

Готовое комплексное оснащение кабинетов особенно полезно для начинающих специалистов и вновь создаваемых клиник, позволяя ускорить запуск медицинской практики и предотвратить ошибки, возникающие при самостоятельной сборке наборов оборудования.

Для повышения эффективности процесса выбора медицинского оборудования предлагается разработать специализированную веб-платформу (рис. 1), которая облегчит процесс поиска, сортировки и сравнительного анализа технических характеристик и параметров оборудования. Реализация подобной платформы создаст условия для оперативного выбора наиболее подходящего оборудования, минимизирует риски ошибочного выбора и повысит общую обоснованность принимаемых решений.

### Выбор офтальмоскопа

Этот сайт поможет вам подобрать офтальмоскоп по заданным параметрам. Вы можете фильтровать приборы по модели, торговой марке, производству, типу освещения, мощности лампы, типу рукоятки, оптической системе и другим характеристикам.

<b>Модель:</b> Пример: BETA 180	<b>Торговая марка:</b> Пример: Heine, Ri-score и т.п.	<b>Производство:</b> Пример: Германия	<b>Тип освещения:</b> ХНЛ, LED и т.п.
<b>Тип рукоятки:</b> Батарейная или Аккумуляторная	<b>Оптическая система:</b> Пример: Асферическая	<b>Количество линз (z):</b> Пример: 2В	<b>Корректирующие линзы (дптр.):</b> Пример: -36 до +36
<b>Количество апертур (z):</b> Пример: 5	<b>Типы апертур:</b> Пример: Большая, малая, фикс	<b>Тип источника питания:</b> Пример: Аккумулятор	<b>Мощность аккумулятора (В):</b> Пример: 3.5
<b>Размер упаковки (см):</b> Пример: 20x10x6	<b>Минимальная стоимость (руб):</b> Пример: 10000	<b>Максимальная стоимость (руб):</b> Пример: 50000	<b>Шаг (дптр.):</b> Пример: 1
<b>Вес (кг):</b> Пример: 0.4			

Найти приборы

Модель	Торговая марка	Производство	Тип освещения	Мощность лампы (Вт)	Тип рукоятки	Оптическая система
BETA 180	Heine	Германия	ХНЛ	2.5	Батарейная	Сферические линзы
BETA 180	Heine	Германия	ХНЛ	3.5	Аккумуляторная	Сферические линзы
BETA 200	Heine	Германия	ХНЛ	2.5	Батарейная	Асферические линзы
BETA 200	Heine	Германия	ХНЛ или LED	3.5	Аккумуляторная	Асферические линзы
BETA 200S	Heine	Германия	ХНЛ	2.5	Батарейная	Асферические линзы
BETA 200S	Heine	Германия	ХНЛ или LED	3.5	Аккумуляторная	Асферические линзы
E-10	Kawe	Kirchner & Wilhelm	ХНЛ	2.5	Батарейная	Сферические линзы
E-30	Kawe	Kirchner & Wilhelm	ХНЛ	2.5	Батарейная	Сферические линзы

Рис.1. Фрагмент веб-платформы для выбора офтальмоскопа

Предлагаемая платформа должна обладать следующими функциональными возможностями:

- Гибкая система фильтрации, позволяющая искать оборудование по ключевым характеристикам (производительность, надежность, совместимость с другим оборудованием, сертификация и др.).
- Полное покрытие базы производителей и моделей, регулярно обновляемая база данных и наглядное сравнение оборудования по множеству параметров.
- Экспертные рекомендации и обзоры оборудования, подготовленные квалифицированными специалистами.

Еще одним важным фактором является выбор оборудования с модульной архитектурой, допускающей постепенное обновление отдельных блоков и адаптацию к будущим изменениям нормативно-правовых требований и технических стандартов. Использование модульных решений снизит общие расходы на замену оборудования и увеличит срок его полезного использования, что позитивно скажется на финансовом положении медицинских учреждений и уровне оказываемой медицинской помощи.

#### Список использованных источников

1. Фролов С.В., Коробов А.А., Потлов А.Ю., Фролова Т.А. Применение бионического подхода при синтезе систем управления многомерными объектами высокой размерности// Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 6. – С. 67-70.
2. Фролов С.В., Потлов А.Ю., Коробов А.А., Савинова К.С. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – №5. – С. 41– 48.

УДК 004.94:616-072.1

**Леньшин С. Г.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов  
e-mail: Stas.Lenshin@mail.ru

**ОТСЛЕЖИВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ АКТУАЛЬНОГО  
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ И ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ КАТЕТЕРА  
ЭНДОСКОПИЧЕСКОГО ЗОНДА**

**Lenshin S. G.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov  
e-mail: Stas.Lenshin@mail.ru

**TRACKING AND VISUALIZATION OF THE CURRENT LOCATION AND  
TRAJECTORY OF THE ENDOSCOPIC CATHETER**

*Аннотация.* Разработка комплексного метода и проектирование технических средств для повышения информативности и безопасности эндоскопии. Метод основан на использовании встроенного в зонд микроэлектромеханический сенсора, данные с которого обрабатываются специализированными алгоритмами для построения 3D-траектории в реальном времени, точной привязки обнаруженных патологий с 3D-картой.

*Ключевые слова:* эндоскопия, 3D-навигация, микроэлектромеханический сенсор, обработка данных в реальном времени.

*Abstract.* Development of a comprehensive method and design of technical means to enhance the informativeness and safety of endoscopy. The method is based on the use of a micro-electro-mechanical sensor embedded in the probe, the data from which is processed by specialized algorithms to build a real-time 3D trajectory and accurately map detected pathologies to a 3D map.

*Keywords:* endoscopy, 3D navigation, micro-electro-mechanical sensor (MEMS), real-time data processing.

*Ключевая проблема:* отсутствие отслеживания пройденной траектории в эндоскопии. В современной гастроскопическом исследовании ориентация эндоскопа в пространстве осуществляется посредством видеоизображения самого эндоскопа, не имея объективной информации о реальной пространственной конфигурации зонда внутри пациента. Что приводит к фундаментальным ограничениям: невозможность картографирования осмотренных участков, неточная привязка патологий, риск формирования петель и осложнений.

Предлагается возможность не использовать рентгеноскопию, как метода контроля. Вместо внешнего источника излучения используется миниатюрный инерциальный измерительный модуль (МЭМС), интегрированный в дистальный конец зонда.

Это превращает сам зонд в самоориентирующуюся систему, которая «чувствует» собственное движение в пространстве, аналогично современным устройствам (смартфонам или VR-шлемам).

Структурная схема проектируемого устройства представлена на рисунке 1.

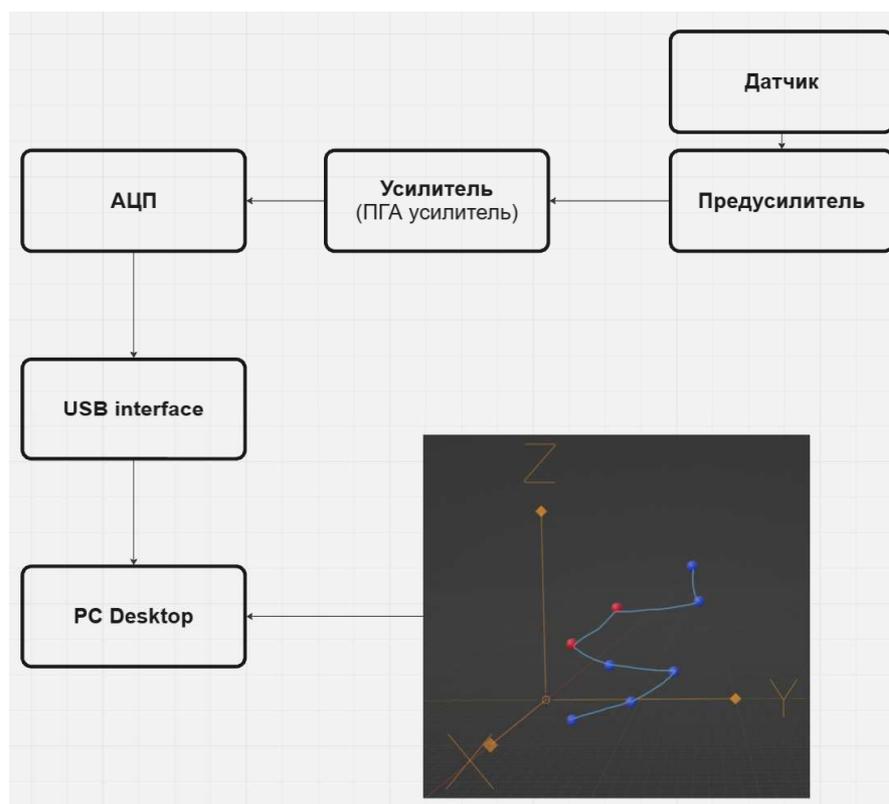


Рис. 1. Бифуркации в системе X

МЭМС-сенсоры (акселерометры, гироскопы) непрерывно регистрируют ускорения и угловые скорости. Современные MEMS имеют цифровые интерфейсы, что решает большинство проблем с фильтрацией и шумами внутри модуля.

Решением устранения помех, вызванных длиной кабеля, за счет размещения малошумящего предусилителя в непосредственной близости от датчика и передачи уже усиленного сигнала по экранированной линии.

Для перехода из локальной системы координат (связанной с зондом) в глобальную (связанную с пациентом) в разрабатываемой программе предполагается реализовать аффинные преобразования с использованием однородных координат. Что позволит объединить поворот и смещение в одну операцию с помощью матрицы преобразования.

Принцип преобразования можно описать следующей формулой (1):

$$\text{Глобальные координаты} = \text{Поворот} * \text{Локальные координаты} + \text{Смещение}$$

$$P\_global = R \cdot P\_local + T \quad (1)$$

где:

$P\_global$  — вектор глобальных координат точки  $[X, Y, Z]$ .

$R$  — матрица поворота размером  $3 \times 3$ , которая описывает ориентацию локальной системы координат.

$P\_local$  — вектор локальных координат точки  $[X', Y', Z']$ .

$T$  — вектор смещения (translation)  $[T_x, T_y, T_z]$ , который указывает, где находится начало локальной системы координат относительно глобальной.

Математическая запись в матричной форме (для 3D):

$$\begin{bmatrix} X\_global \\ Y\_global \\ Z\_global \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R11 & R12 & R13 & T_x \\ R21 & R22 & R23 & T_y \\ R31 & R32 & R33 & T_z \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X\_local \\ Y\_local \\ Z\_local \end{bmatrix}$$

Вычисление ориентации (матрицы поворота «R»): для надежного и точного расчета поворота в реальном времени используется представление в виде кватернионов. Этот метод должен исключить проблему «шарнирного замка», которая характерна для простых углов Эйлера и может приводить к потере ориентации. Данные с гироскопа (угловые скорости) и акселерометра (линейные ускорения) объединяются с помощью комплементарного фильтра или фильтра Калмана. Что должно позволить нивелировать шумы каждого из датчиков и вычислить текущую ориентацию зонда.

Все движения зонда и ключевые точки (например, места взятия биопсии или обнаружения патологий) будут фиксироваться в цифровом протоколе. Это обеспечит точную пространственную привязку, что важно для динамического наблюдения, хирургического планирования или повторного исследования, устраняя субъективизм в описании локализации.

Разработка представляет собой замкнутый цикл: от теоретического анализа и создания математической модели → через проектирование и сборку экспериментального образца аппаратуры → к разработке специализированного программного обеспечения для обработки и 3D-визуализации.

#### Список использованных источников

1. Дубровин. В. В. Аппаратно-программные средства повышения точности медицинских приборов на основе нейронных сетей / В. В. Дубровин, И. С. Рязанов, О. О. Голубятников // Математические методы в технике и технологиях. – Т. 27, № 3. – 2014. – С. 131–132.
2. Фролова. М. С. Информационная модель медицинской техники на основе объектно-ориентированного подхода / М. С. Фролова, Т. А. Фролова, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. – 2015. – № 4. – С. 139 – 145.
3. Дубровин. В. В. Аппаратно-программные средства повышения точности медицинских приборов на основе нейронных сетей / В. В. Дубровин, И. С. Рязанов, О.

О. Голубятников // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27. – 2014. – № 3(62). – С. 131–132.

4. Кузнецов. А. А. Использование микроэлектромеханических систем (МЭМС) в медицинских диагностических приборах / А. А. Кузнецов, П. И. Лебедев // Биомедицинская техника. – 2017. – Т. 51, № 5. – С. 25–31.

5. Яковлев. Н. Г. Алгоритмы слияния данных инерциальных датчиков для систем навигации медицинских инструментов / Н. Г. Яковлев, С. В. Матвеев // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 62, № 7. – С. 56–63.

6. Ivanov. P. Development of a MEMS-based orientation tracking system for flexible endoscopes / P. Ivanov, L. Petrov // Biomedical Engineering Online. – 2020. – Vol. 19, No. 2. – P. 112–118.

7. Фомин. С. В. Методы трёхмерной реконструкции органов по данным эндоскопического осмотра / С. В. Фомин, Д. А. Ефимов // Вестник новых медицинских технологий. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 47–54.

8. Lee. J. Real-time 3D mapping during endoscopy using inertial and visual data fusion / J. Lee, K. Tanaka // IEEE Transactions on Medical Imaging. – 2019. – Vol. 38, No. 11. – P. 2485–2494.

9. Пахомов. И. С. Системы навигации эндоскопических зондов на основе инерциальных измерительных модулей / И. С. Пахомов, Е. В. Киселева // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2022. – № 3. – С. 92–101.

10. Zhang. W. Sensor fusion and Kalman filtering for endoscopic pose estimation / W. Zhang, M. Chen // Sensors and Actuators A: Physical. – 2020. – Vol. 305. – P. 111–119.

11. Орлова. Е. А. Повышение точности позиционирования медицинских инструментов с использованием фильтра Калмана / Е. А. Орлова, Д. С. Мартынов // Научно-технический вестник информационных технологий. – 2021. – Т. 19, № 2. – С. 73–80.

12. Smirnov. A. Integration of MEMS gyroscopes in medical imaging systems / A. Smirnov, V. Korotkov // Procedia Engineering. – 2018. – Vol. 201. – P. 433–439.

13. Фролов С.В., Потлов А.Ю., Коробов А.А., Савинова К.С. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – №5. – С. 41–48.

14. Фролов С.В., Потлов А.Ю. Доплеровское картирование кровотока в мягких биологических тканях на основе обработки данных оптической когерентной томографии в режиме реального времени// Медицинская техника. – 2021. – №2. – С.1-4.

УДК 681.5

**Любавина М. А., Фролова Т.А.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: milenaliubavina@mail.ru

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ДВИГАТЕЛЬНОЙ И ЗВУКОВОЙ АКТИВНОСТИ МЛАДЕНЦА**

**Lyubavina M.A., Frolova T.A.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: milenaliubavina@mail.ru

## **DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR MONITORING INFANT MOTOR AND SOUND ACTIVITY**

*Аннотация.* Разработано приложение, включающее систему мониторинга и анализа сна младенца, в целях оптимизации режима сна и улучшения качества жизни как ребенка, так и родителя. В основе приложения лежит комплексный подход, объединяющий ручной ввод данных о дневном сне с автоматизированным ночным мониторингом.

*Ключевые слова:* приложение, ребенок, сон, датчик, Android.

*Abstract:* An application has been developed that includes a system for monitoring and analyzing infant sleep in order to optimize sleep patterns and improve the quality of life of both the child and the parent. The application is based on an integrated approach that combines manual data entry on daytime sleep with automated nighttime monitoring.

*Keywords:* application, child, sleep, sensor, Android.

Современные тенденции в области биомедицинской инженерии демонстрируют растущий интерес к разработке доступных и эффективных систем мониторинга физиологического состояния пациентов [1,2]. Одним из перспективных направлений является создание специализированных устройств для контроля сна младенцев, сочетающих точность измерений, безопасность применения и простоту использования.

Основой аппаратной части системы стал микроконтроллер NodeMCU на базе ESP8266, выбранный благодаря наличию интегрированного модуля Wi-Fi и достаточной вычислительной мощности для обработки сигналов с датчиков. Важным преимуществом данной платформы является возможность работы с различными протоколами беспроводной связи и низкое энергопотребление.

Ключевым элементом системы мониторинга двигательной активности является инерционный датчик MPU6050, содержащий трехосевой акселерометр и гироскоп. Особенностью реализации алгоритма обработки данных стала калибровка чувствительности датчика под специфику движений младенца во сне. Датчик настроен

на регистрацию как макродвижений (перевороты, вздрагивания), так и усиленных движений ребенка во время пробуждения.

Для мониторинга звуковой активности применяется аналоговый микрофонный модуль KY-037 с программируемым усилителем низкой частоты. Особенностью реализации является использование адаптивного порога срабатывания. Алгоритм анализа звука включает частотную фильтрацию сигнала с выделением диапазона, характерного для детского плача (200–600 Гц), эффективно отсекая посторонние шумы. Общая схема аппаратной части представлена на рисунке 1.

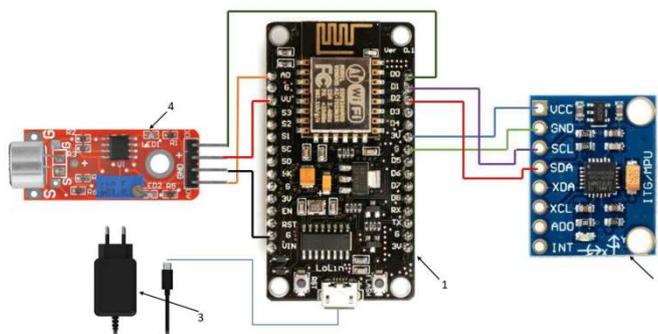


Рис. 1. Схема аппаратной составляющей

Информационная часть приложения была реализована на языке Kotlin в среде Android Studio. Программа разделена на некоторые модули, где каждый из них имеет свои функции и компоненты. Основная активность MainActivity отвечает за управление навигацией между экранами, а также координирует работу секундомера и таймера. Три специализированных фрагмента TimerFragment, StopwatchFragment и StatsFragment обеспечивают логическую работу между функциональными блоками таймера, секундомера и графика соответственно. Для хранения данных используется оптимизированная система управления SleepDataManager, обеспечивающее структурированное сохранение информации с группировкой по дате записей о сне.

Таким образом, полученный комплекс представляет собой новое решение для мониторинга сна ребенка. Перспективы развития системы включают интеграцию дополнительных датчиков для мониторинга температуры и влажности, реализацию возможности записи нескольких статистических данных.

#### Список использованных источников

1. Современное состояние и тенденции в области исследований и разработок неонатальных инкубаторов / С. В. Фролов, А. А. Коробов, К. С. Савинова, А. Ю. Потлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. – № 11(4). – URL : <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1473>
2. Фролов, С. В. Риски инкубационной терапии / С. В. Фролов // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. Восьмой Всерос. молодеж. науч. конф., Тамбов, 10 мая 2023 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2023. – С. 334 – 336.

УДК 681.3 : 616.89

**Кузнецова А.В., Петров И.Э., Фролов С.В.**

Тамбовский государственный технический университет, Россия, г. Тамбов

e-mail: irinka.dro@yandex.ru

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ПРОТОТИПА УМНЫХ ОЧКОВ С ФУНКЦИЕЙ ТРАНСКРИБИРОВАНИЯ РЕЧИ  
ДЛЯ ЛЮДЕЙ С НАРУШЕНИЯМИ СЛУХА**

**Kuznetsova A.V., Petrov I.E., Frolov S.V.**

Tambov State Technical University, Russia, Tambov

e-mail: irinka.dro@yandex.ru

**FEATURES OF SOFTWARE DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF SMART  
GLASSES WITH SPEECH TRANSCRIPTION FUNCTION FOR PEOPLE WITH  
HEARING IMPAIRMENTS**

*Аннотация.* Рассмотрены ключевые особенности разработки программного обеспечения прототипа умных очков, использующие технологию перевода речи в текст для людей с нарушениями слуха. Описаны основные методы распознавания речи собеседника или спикера, а также выделение ее из существенного количества посторонних звуков. Предложены библиотеки с открытым кодом, работающие с функцией транскрибирования речи.

*Ключевые слова:* умные очки, программное обеспечение, нарушение слуха.

*Abstract.* The key features of the software development of a prototype of smart glasses using speech-to-text technology for people with hearing impairments are considered. The main methods of speech recognition of the interlocutor or speaker are described, as well as its isolation from a significant number of extraneous sounds. Open source libraries working with the speech transcription function are proposed.

*Keywords:* smart glasses, software, hearing impairment.

Проблема коммуникации людей с нарушениями слуха остается актуальной в современном обществе. У данной категории населения возникают сложности распознавания устной речи, шумовые помехи и невозможность визуального контакта с говорящим, а существующие решения типа слуховых аппаратов и специализированных приложений обладают недостатком слабого качества восприятия звуков, низкой точности интерпретации эмоций и ограниченным функционалом в условиях сложного акустического окружения и не позволяют эти барьеры преодолеть [1]. Решением проблемы выступает использование умных очков с функцией транскрибирования речи и выведения текстовых данных на дисплей устройства. В данной статье рассмотрены

ключевые особенности разработки программного обеспечения прототипа умных очков, использующие технологию перевода речи в текст для людей с нарушениями слуха.

Предлагаемое решение включает использование технологии дополненной реальности и интеграции с облаком Yandex для точного распознавания речи и её визуализации на устройстве. Очки оснащены несколькими микрофонами, позволяющими определить направление звука и повысить точность распознавания.

Облако Yandex обладает рядом возможностей. В этот перечень входят функции SpeechKit, Cloud Functions, Yandex Database, Object Storage.

SpeechKit отвечает за распознавание речи, синтез речи и управление голосовыми интерфейсами. Предварительные этапы обработки обеспечивают очищение сигнала и выделение голоса нужного человека. Затем чистый сигнал поступает в систему Speech-to-Text, которая расшифровывает речь в текст. Сам процесс преобразования осуществляется на стороне сервера, и лишь подготовленный и обработанный аудиопоток передается на обработку.

Cloud Functions позволяет запускать небольшие фрагменты серверного кода для обработки запросов и отправки результатов обратно устройству. Также в возможности Yandex входит работа с базой данных для хранения настроек пользователей, профилей и истории взаимодействия и хранилищем файлов и конфигураций, если потребуется хранение медиа-файлов или большого объёма текстовых данных [2].

Перед разработчиком умных очков для слабослышащих и глухих людей может возникнуть проблема создания технологии распознавания речи собеседника или спикера, а также выделение ее из толпы и огромного количества посторонних звуков. Существует несколько подходов, которые помогают выполнить вышеописанную задачу. Например, метод использования направленных микрофонов, анализ акустического профиля, алгоритмы разделения источников сигнала, контекстуальная фильтрация.

Микрофонные массивы используют принцип формирования луча, направленного на источник речи. Это достигается путём установки нескольких микрофонов таким образом, чтобы усиленно воспринимать звуки из конкретной зоны пространства и подавлять шумы из других направлений. Система включает два или четыре микрофона, расположенных на устройстве. Сигнал обрабатывается специальными алгоритмами, которые усиливают сигнал говорящего лица и уменьшают влияние окружающих шумов и звуков других людей.

Метод анализа акустического профиля заключается в идентификации уникальных характеристик голоса каждого говорящего («акустический отпечаток»). Технология анализирует спектральные характеристики сигналов и выделяет особенности голоса конкретного человека, позволяя фокусироваться исключительно на нём. Пользователь заранее записывает образец своего голоса, и эта запись служит эталоном для дальнейшей идентификации.

Алгоритмы разделения источников сигнала применяют методы машинного обучения и анализа частотных компонентов для отделения отдельных источников звука друг от друга. Модели глубокого обучения обучаются различать характерные паттерны

разных голосов и изолируют сигналы конкретных спикеров даже в условиях наложенных фоновых разговоров.

В рамках контекстуальной фильтрации система принимает во внимание контекст разговора и историю предыдущих взаимодействий, чтобы предсказывать, чей голос является наиболее релевантным в текущий момент. Если приложение часто получает запросы от конкретного пользователя, оно автоматически настраивается на фильтрацию его голоса среди множества голосов [3].

Существуют программные обеспечения с открытым кодом, которые могут выступать в качестве альтернативы Yandex Cloud такие, как Mozilla DeepSpeech, Kaldi ASR Framework, OpenAI Whisper. Однако было решено выбрать отечественный ресурс, так как он включает в себя готовую технологию транскрибирования речи и значительно упрощает процесс создания прототипа умных очков для людей с нарушением слуха.

Данная работа демонстрирует возможности инновационных технологий в области медицины и социальной адаптации людей с инвалидностью. Результаты текущих исследований открывают перспективы дальнейшего развития устройств для улучшения качества жизни пациентов.

#### Список использованных источников

1. Фролова, Т.А., Information models of a medical device for its evaluation / Т.А. Фролова, М.С. Фролова, И.А. Толстухин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: ТГТУ, 2015. – Т. 21. – №4. – С.587-591.
2. Фролова, Т. А. Информационные модели для оценки медицинского устройства / Т. А. Фролова, М. С. Фролова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы IV Международной научно-практической конференции. – Тамбов: ТГТУ, 2017. – Вып. 4.Т.3. – С.123-128.
3. Фролова, М. С. Информационная модель медицинской техники на основе объектно-ориентированного подхода / М. С. Фролова, Т. А. Фролова, И. А. Толстухин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – Тамбов: ТГТУ, 2015. – №4(58). – С.139-145.

Научное электронное издание

**ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ,  
ПРОТОТИПИРОВАНИЕ И  
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ДИЗАЙН**

**Материалы XI Международной  
научно-практической конференции**

**Выпуск 11**

**VIRTUAL SIMULATION, PROTOTYPING  
AND INDUSTRIAL DESIGN**

**Issue 11**

Компьютерное макетирование Е. Е. Румянцевой, Т. Ю. Зотовой  
Обложка, упаковка, тиражирование Т. Ю. Зотовой

**ISBN 978-5-8265-2969-0**



Подписано к использованию 05.12.2025.  
Тираж 100 шт. Заказ № 127

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5,  
помещение 2, к. 14.

Телефон (4752) 63-81-08.

E-mail: [izdatelstvo@admin.tstu.ru](mailto:izdatelstvo@admin.tstu.ru)