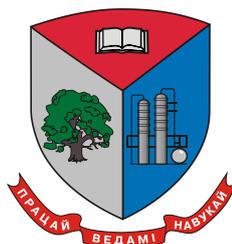


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

*Посвящается Дню белорусской науки*



**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.  
ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА**

**Материалы докладов  
90-й научно-технической конференции  
профессорско-преподавательского состава,  
научных сотрудников и аспирантов  
(с международным участием)**

**2–20 февраля 2026 года**

Минск 2026

УДК 005.745  
ББК 32.81:22.3:22.1я43  
И 74

**Информационные технологии. Физика и математика :** материалы 90-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 2–20 февраля 2026 года [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за издание С.А. Касперович. – Минск : БГТУ, 2026. – 279 с.  
ISBN 978-985-897-339-1.

Сборник составлен по результатам научно-технической конференции сотрудников Белорусского государственного технологического университета, в которых отражены новые успехи и достижения в информационных технологиях: алгоритмизации и программировании, передачи и обработки данных.

Предназначен для работников различных отраслей народного хозяйства, научных сотрудников, специализирующихся в соответствующих областях знаний, аспирантов и студентов ВУЗов.

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой физики  
канд. техн. наук, зав. кафедрой программной  
инженерии

Н.Н. Крук

канд. техн. наук, зав. кафедрой информатики  
и веб-дизайна

В.В. Смелов

канд. техн. наук, декан факультета  
информационных технологий

Д.М. Романенко

Д.В. Шиман

Главный редактор

ректор, канд. экон. наук С.А. Касперович

ISBN 978-985-897-339-1.

© УО «Белорусский государственный  
технологический университет», 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

### 8.1 ПОДСЕКЦИЯ“ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ”

<i>Жиляк Н.А.</i> Применение фрактальных процедурных объектов в алгоритме вычисления коллизий.....	8
<i>Гурин Н. И., Часнойть А.</i> Генерация простых Telegram-ботов на основе пользовательских запросов.....	11
<i>Сидорик Я. А., Пустовалова Н. Н.</i> Конструктор баз данных для PostgreSQL.....	15
<i>Ржеутская Н. В.</i> Адаптивная система автоматизированного оценивания знаний на основе семантического анализа текстовых ответов с использованием NLP.....	18
<i>Блинова Е.А., Нистюк О. А.</i> Метод стеганографического преобразования информации в STEP-файлах.....	21
<i>Николайчук А. Н.</i> Обнаружение стеганографических угроз на основе анализа аномалий в сетевом трафике с использованием ids/ips .....	24
<i>Савельева М. Г.</i> Алгоритмические особенности реализации стеганографического преобразования WEB-документов на основе растровой графики и модели RGB .....	28
<i>Уласевич Н. И., Жиляк Н. А.</i> Обзор методов стеганализа для векторных стгоконтейнеров.....	32
<i>Сазонова Д. В.</i> Применение нейронных сетей для обнаружения уязвимостей криптографических протоколов и программных библиотек .....	35
<i>Алешаускас В. А.</i> Интеграция корпоративных информационных систем на платформе 1С с внешними базами данных .....	38
<i>Кантарович В. С., Урбанович П. П.</i> Особенности разработки и применения GAN-модели для обфускации программного кода.....	42
<i>Сувханов Д.Д.</i> Использование искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа данных и их обработка в реальном времени .....	47
<i>Евдокимова С.А.</i> Уязвимости информационной безопасности систем компьютерного зрения .....	49
<i>Нурлыева М.Х.</i> Современные технологии передачи и обработки данных в условиях цифровой трансформации .....	53
<i>Семёнова В.Г., Соловьёва Е.А.</i> Перспективные технологии в образовании: интеграция AR и VR в учебный процесс .....	56
<i>Колесенков А.Н.</i> Адаптивный метод синтеза мультимодальных данных на основе динамического взвешивания признаков с учетом их информативности .....	59

## **8.2 ПОДСЕКЦИЯ "АЛГОРИТМИЗАЦИЯ И ПРОГРАММИРОВАНИЕ. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ"**

<i>Некрасова А. П., Смелов В.В.</i> Эффективный алгоритм нелинейного раскрытия плоских поверхностей на комплекты деталей при временных ограничениях вычислений .....	63
<i>Смелов В.В., Точило О.В.</i> Естественный языковый интерфейс для генерации запросов к базе данных .....	65
<i>Белодед Н. И., Лыкова Ю.Д.</i> Модель представления знаний для естественно языкового интерфейса .....	68
<i>Гончар Е.А.</i> Обзор программного обеспечения для симуляции NDN сетей .....	71
<i>Белодед Н.И.</i> Использование инновационных технологий в образовании .....	75
<i>Наркевич А.С.</i> Основы UEFI-программирования .....	80
<i>Савицкий А.Ю., Герасимов А.С.</i> Развитие алгоритмических подходов под влиянием генеративного искусственного интеллекта и его последствия для программной инженерии .....	85
<i>Шерстнева А.А.</i> Алгоритмы управления перегрузками в инфокоммуникационных системах .....	90

## **8.3 ПОДСЕКЦИЯ "ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА В ДИЗАЙНЕ, КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА"**

<i>Новосельская О.А., Савчук Н.А.</i> Цветовые профили. Особенности представления данных .....	93
<i>Короленя Р. О.</i> SEO в 2025 году и прогнозы на 2026 год .....	97
<i>Короленя Р.О., Новик И.И.</i> Имитационное моделирование продвижения нового товара на рынок .....	100
<i>Шутько Н.П., Игнаткова Я.А.</i> Особенности кастомизации элементов HTML-форм средствами CSS .....	103
<i>Шутько Н.П., Игнаткова Я.А.</i> Новые возможности CSS для адаптивной вёрстки .....	107
<i>Кизино А.В., Новосельская О.А.</i> Индексирование символов как метод изменения вероятностной статистики в подстановочных шифрах .....	111
<i>Осоко С.А., МIRONЧИК Е.С.</i> Технические и экономические вызовы при внедрении искусственного интеллекта в производство .....	114
<i>Осоко С.А.</i> Программное обеспечение для автоматизации создания технической документации: инструменты и их применение .....	117
<i>Обухова Е.В., Шутько Н.П.</i> Оценка эффективности транскодирования видео на базе MOVIEPY и FFMPEG .....	120

<i>Ворошень В.А., Романенко Д.М.</i> Определение акцентных цветов на растровых изображениях с использованием алгоритмов кластеризации .....	124
<i>Попеня Н.В.</i> Структура гибридного метода защиты авторских прав на мультимедийный контент .....	128
<i>Кудлацкая М.Ф.</i> Управление глобальным состоянием в react-приложениях .....	132
<i>Гарабажу М.А., Романенко Д.М.</i> Алгоритмы идентификации изображений, построенных на основе полиномов высоких порядков .....	136
<i>Дятко А.А.</i> Модель радиолокационного сигнала, отраженного от морской поверхности при наличии судов.....	140
<i>Гайдук С.С.</i> Искусственный интеллект в проектировании интерьеров и мебели .....	144
<i>Myradov P.S., Haytkulyyev D.M.</i> Developing a Secure Web Application for Analyzes Data Leaks via Email.....	147
<i>Котенева Т.А.</i> От задачи о квадратуре круга к современным технологиям параметрического моделирования .....	149
<i>Селицкий Д.А.</i> Сравнение эффективности симуляции алгоритма гровера и классических алгоритмов поиска .....	153
<i>Семенов Г.К., Жихарева А.А.</i> Шум перлина как инструмент моушн-дизайнера .....	157
<b>8.4 ПОДСЕКЦИЯ "ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ"</b>	
<i>Якименко А. А.</i> К вопросу о модальном управлении двумерной запаздывающей системой с пятью соизмеримыми запаздываниями	160
<i>Борковская И. М.</i> Стабилизируемость систем третьего порядка с запаздыванием .....	164
<i>Игнатенко В.В., Леонов Е. А.</i> Математические стохастические модели в лесной промышленности .....	167
<i>Слепцов В. Ф.</i> Искусственный интеллект – иллюзия интеллекта .....	171
<i>Яроцкая Л. Д.</i> К вопросу применения свёрточного метода при вычислении интегралов .....	175
<i>Крахотко В.В., Горячкин В.В., Игнатенко В.В.</i> Построение решения многомерной дискретной системы.....	178
Исследование процесса непрерывного центробежного фильтрования суспензии .....	180
<i>Волк А.М., Янович С.В., Вилькоцкий А.И.</i> О дробных производных почти периодических функций ограниченной Р-вариации .....	183

<i>Дмитрук Н.М.</i> Метод построения множеств управляемости для линейных дискретных систем с возмущениями в классе многократно замыкаемых стратегий управления.....	186
<i>Карлович Т.Б., Наркевич А.Л.</i> Влияние силы трения на движение волчка тип-топ по горизонтальной поверхности при его автоматизированном запуске .....	190
<i>Соловьева И.Ф.</i> Об одной модификации метода пристрелки для нелинейных граничных задач с пограничным слоем.....	194
<i>Крук Н. Н., Петрова Д. В., Гладков Л. Л., Клеицкий Д. В., Слиж А. А.</i> Взаимосвязь основности макроцикла и архитектуры периферического замещения алкилированных корролов.....	197
<i>Клеицкий Д. В., Гладков Л. Л., Вершиловская И. В., Крук Н. Н.</i> Об изменении ароматичности тетрапиррольных макроциклов при заселении нижнего триплетного T1 состояния.....	201
<i>Крылов А. Б., Пискунович Д. Н., Крук Н. Н.</i> Влияние температуры на кислотно-основные свойства 5,10,15,20-тетраakis-(4-триметиламино-фенил)-порфирина в основном S0 и нижнем возбужденном S1 синглетном состоянии .....	206
<i>Фарафонтова Е. В., Наркевич И. И.</i> Статистический расчет энергий образования элементарных флуктуаций поля плотности в наноразмерных молекулярных системах.....	210
<i>Наркевич И. И., Фарафонтова Е. В.</i> Статистическое изучение характера взаимодействия элементарных флуктуаций плотности в молекулярной системе.....	213
<i>Бобрович О. Г., Поплавский В. В.</i> Особенности формирования покрытий на поверхности кремния в процессе ионно-ассистируемого осаждения металлов.....	216
<i>Поплавский В. В., Бобрович О. Г., Дорожко А. В., Матыс В. Г.</i> Микроструктура и состав слоев, формируемых на поверхности алюминиевого сплава Д16 в процессе ионно-ассистируемого осаждения металлов.....	220
<i>Миксюк Ю.И., Даденков И.Г., Саечников К.А., Толстик А.Л.</i> Мультиплексная запись и динамика релаксации решеток в фоторефрактивных кристаллах.....	223
<i>Мисевич А. В.</i> Кинетика адсорбционно-резистивного отклика на диоксид азота пленок композита фталоцианин меди – полистирол.	227
<i>Тулъев В. В.</i> Композиционный состав приповерхностных слоев структур, полученных ионно-ассистируемым осаждением атомов титана и кобальта на кремнии с ксеноновым маркером .....	231
<i>Тарасенко Н. В., Буцень А. В.</i> Получение многокомпонентных наночастиц при лазерной абляции в жидкости.....	234

<i>Филиппова П. П., Григорьева Д. В., Горудко И. В.</i> Изучение биологической активности гибридных микрочастиц ватерита с каталазой в модельных клеточных системах .....	237
<i>Бушук С.Б., Пучковский И.Н., Шавель С.С., Куликовская П.А., Ходасевич М.А.</i> Одновременная калибровка механического напряжения и температуры с помощью одиночной изотропной волоконной брэгговской решетки и линейных и нелинейных методов машинного обучения .....	243
<i>Асеев В. А., Королько Д. А., Савчук А. А., Ходасевич М. А.</i> Влияние вида предобработки лазерных эмиссионных спектров на точность линейных и нелинейных многопараметрических калибровочных моделей состава биллонных сплавов .....	247
<i>Колодочка П. С., Ляхнович А. В., Ходасевич М. А., Си Хунджу, Шу Джей, Сюй Вэй.</i> Повышение точности классификации географического происхождения лекарственного растительного сырья при помощи выбора спектральных переменных в ТГЦ спектрах пропускания методом поиска комбинации окон оптимальной ширины .....	251
<i>Артыкова Г.Д., Водчиц А.И., Ходасевич И.А., Капанов П. Н.</i> Спонтанное и вынужденное комбинационное рассеяние микрокристаллов КGW: выбор среды для "случайных" лазеров .....	255
<i>Гусейнов А.Э.</i> Структурирование экспертных знаний на основе аппарата нечеткой логики .....	259
<i>Евдокимова С.А., Моисеев В.С., Скрыпников А.В.</i> Разработка программного приложения для управления информационной безопасностью интернета вещей .....	263
<i>Пренов Р., Мамедсалиев Р.</i> Об одной начально-краевой задаче для системы дифференциальных уравнений первого порядка ....	267
<i>Мухидинов Д.Х., Мухиддинов Д.Х., Романчак В.М.</i> Квалиметрическая модель в шкале равных отношений для сравнительного анализа онлайн-платформ образовательного назначения Узбекистана и Беларуси .....	271
<i>Мырадов П.С., Сохбедов Дж.</i> Разработка платформы, обеспечивающей защиту с помощью искусственного интеллекта для обнаружения подозрительной активности в сетевом трафике .....	273
<i>Барковский Е.В.</i> Особенности математического моделирования процесса онлайн-контроля качества полиграфического производства .....	

## 8.1 Подсекция “ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ДАННЫХ”

УДК 004.032.6

Н.А. Жилияк, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ПРОЦЕДУРНЫХ ОБЪЕКТОВ В АЛГОРИТМЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЛЛИЗИЙ

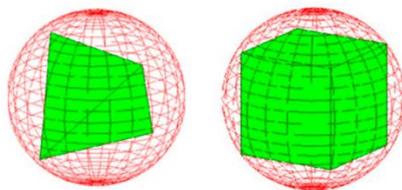
Разрабатываемый алгоритм вычисления коллизий должен предоставлять определенные преимущества, которые отсутствуют в существующих алгоритмах вычисления коллизий, либо не развиты в полной мере [1-3].

Существующие на данный момент алгоритмы вычисления коллизий значительно оптимизированы под основной подход представления геометрических форм объектов: примитивы, полигональные сетки, выпуклые объекты. Более нишевые примеры применения алгоритмов коллизий недостаточно развиты, поэтому для разработки собственного алгоритма имеет смысл ориентироваться на них.

Изначальная идея заключалась в представлении частей крупных объектов и примитивов в качестве сфер, в которые вписаны в правильные тетраэдр или куб. Координаты правильных примитивов, вписанных в сферу, могут быть вычислены через данные сферы – центр и радиус, что становится проще сделать, чем для оригинальных объектов (рис. 1).

Примитивы в такой системе по умолчанию получают в распоряжение ограничивающий объем в виде описывающей их сферы. Подобный метод может предоставить альтернативный способ создания полигональных сеток, где используются сферы вместо плоских объектов.

Также, вогнутые объекты, использующие полигональные сетки в традиционных алгоритмах, решаются с помощью разбиения объекта на несколько выпуклых либо использованием специализированных сложных алгоритмов, что создает нагрузки. С использованием описанного подхода сложный объект выражает свою форму с помощью объемных фигур вместо плоскостей, отчего вогнутые объекты не должны вызывать проблем. Также, благодаря изначальной объемности объектов, проще реализуются мягкие тела, которые по умолчанию требуют вычислений внутренней части тела, а не только его оболочку.



**Рисунок 1 – Описанные сферой примитивы  
(тетраэдр слева, куб справа)**

Проблемы у данного метода представления объектов заключаются в ограниченности потенциальных форм объектов, в отличие от полигональных сеток, где формы могут быть какие угодно. К тому же, алгоритм крайне ограничен в трансформациях исходных объектов: вращения и увеличения размеров.

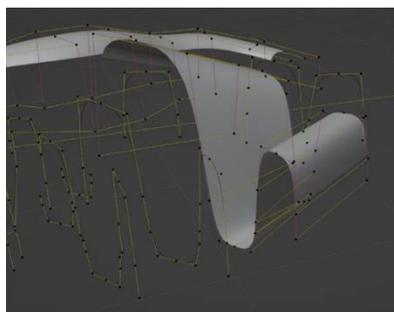
При вращении необходимо производить дополнительные сложные расчеты координат вписанных объектов, что потенциально убивает всю пользу от использования метода.

При увеличении размеров требуются значительные вычислительные способности при трансформациях объектов, особенно при увеличении размеров объекта по одной оси, требуя вычислений эллипсоида, что значительно сложнее сделать, чем со сферой.

В результате, данный алгоритм становится крайне ситуативным, при этом давая несопоставимо малые преимущества в скорости.

Тем не менее, есть иные способы выражения сложных объектов – в частности, параметрические модели. Их форма определяется формулами и вставляемыми в них параметрами, нежели полигональными сетками (рис. 2).

Преимущества параметрических моделей заключаются в значительной оптимизации используемой памяти по сравнению с полностью сохраняемыми полигональными сетками. Благодаря этому, особенности принимать невероятно сложные формы при использовании определенных формул, а также возможности анимировать сам коллайдер посредством привязки параметров коллайдера ко времени, делает параметрические модели эффективным объектом для применения в физических движках.



**Рисунок 2 – Параметрическая поверхность, использующая кривые NURBS**

Недостатки параметрических моделей заключаются в необходимости сложных вычислений формы объекта каждый раз, когда выполняются проверки на коллизию. Таким образом, получаем, что системы на основе примитивов быстры, но ограничены в своих формах. Напротив, параметрические модели имеют свободные формы, но крайне сложно вычисляются, чтобы применять их в алгоритме вычисления коллизий. Поэтому, для реализации алгоритма использована модель объектов, которые представляют собой множество простых объектов, при этом определяют свои формы с помощью формул с изменяемыми параметрами – фрактальные объекты.

Задачей нового алгоритма вычисления коллизий является использование фрактальных объектов в качестве поверхности движения по ним объектов.

Фрактальные объекты представляют собой примитивы, такие как сфера, тетраэдр или куб, которые подверглись множеству рекурсивных трансформаций. Таким образом, вычисление коллизий объектов сводится к вычислению столкновения примитива с другими объектами.

Разработанный алгоритм вычисления коллизий, основанный на принципах фрактального процедурного объекта позволяет создавать сложные и реалистичные формы объектов, а также обеспечивает гибкость и масштабируемость в процессе разработки игровых приложений. Алгоритм предоставляет возможность создания разнообразных фрактальных объектов с использованием различных параметров и правил. Это позволяет адаптировать алгоритм под конкретные требования и задачи игровых приложений

## ЛИТЕРАТУРА

1. 3D Collision Detection: A Survey [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://www.researchgate.net/publication/220252331\\_3D\\_Collision\\_Detection\\_A\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/220252331_3D_Collision_Detection_A_Survey).
2. Mdn Web Docs [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Games/Techniques/2D\\_collision\\_detection](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Games/Techniques/2D_collision_detection).
3. Collision Detection: Algorithms and Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gamma-web.iacs.umd.edu/papers/COLLISION/wafr.pdf>.

## **ГЕНЕРАЦИЯ ПРОСТЫХ TELEGRAM-БОТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ЗАПРОСОВ**

В настоящее время мессенджер Telegram широко используется не только как средство общения, но и как платформа для создания различных сервисов на основе ботов – автоматизированных программ, которые взаимодействуют с пользователями через чат и выполняют определённые действия по заранее заданной логике. Telegram-боты применяются для получения информации о погоде, напоминаний, рассылок сообщений, автоматизации рутинных задач и взаимодействия с пользователями. Однако разработка даже простого Telegram-бота требует понимания базовых принципов функционирования API Telegram и определенной настройки его окружения, что может быть затруднительно для пользователей без соответствующей технической подготовки. Используя Telegram-боты, пользователь, не обладающий навыками программирования, может получить готовый код простого Telegram-бота, который при необходимости может быть дополнительно настроен или расширен.

В связи с этим актуальной является задача автоматизации процесса создания простых Telegram-ботов. Особенно перспективным направлением является разработка систем, которые позволяют генерировать боты на основе текстовых запросов пользователя, описывающих требуемую функциональность. Такой подход снижает порог входа, ускоряет разработку и позволяет создавать прототипы сервисов без глубокого погружения в программирование.

В данной работе представлена версия программного прототипа системы, предназначенной для генерации простых Telegram-ботов на основе текстовых запросов пользователя. В рамках данной версии рассматриваются боты с базовой функциональностью, такие как бот для получения информации о погоде, бот-напоминалка и бот для рассылки сообщений.

В работе решены следующие задачи:

- разработан механизм определения типа бота на основе пользовательского текстового запроса;
- реализована система генерации Telegram-ботов на основе заранее подготовленных шаблонов;
- протестирована работа системы на примерах пользовательских запросов.

Для реализации поставленной задачи был разработан программный прототип Telegram-бота-конструктора, который принимает текстовые сообщения от пользователя и на их основе генерирует другие Telegram-боты. В качестве языка программирования был выбран Python, а для взаимодействия с Telegram API использована библиотека aiogram, позволяющая быстро создавать асинхронные боты.

Архитектура системы включает следующие основные компоненты:

- Telegram-бот-генератор, принимающий сообщения от пользователя.
- Модуль анализа запроса, определяющий тип требуемого бота.
- Модуль генерации, создающий новый бот на основе шаблона.
- Набор шаблонов простых Telegram-ботов.

Схема взаимодействия компонентов системы представлена следующей последовательностью:

1. Пользователь отправляет текстовый запрос основному генератор-боту в Telegram.
2. Генератор-бот принимает сообщение и передаёт его в модуль анализа пользовательского запроса.
3. Модуль анализа определяет тип создаваемого бота на основе ключевых слов.
4. Генератор-бот запрашивает у пользователя токен Telegram-бота.
5. Полученный токен передаётся в модуль генерации ботов.
6. Модуль генерации создаёт новый экземпляр Telegram-бота на основе выбранного шаблона.
7. Модуль управления ботами запускает созданного бота и контролирует его жизненный цикл.
8. Созданный бот начинает взаимодействовать с конечными пользователями в Telegram.

Определение типа бота реализовано с использованием rule-based подхода. Текст пользовательского запроса приводится к нижнему регистру, после чего проверяется наличие ключевых слов, характерных для определённого типа бота. Например, наличие слов «погода» или «погодный» соответствует боту погоды, слова «напоминание» или «напомни» – боту-напоминалке, а слова «рассылка» или «сообщение всем» – боту рассылки.

После определения типа бота система выполняет генерацию нового Telegram-бота. Генерация осуществляется путём копирования соответствующего шаблона из каталога шаблонов в отдельную директорию сгенерированных ботов. Каждый шаблон представляет собой

минимально работоспособный Telegram-бот с реализованной основной функциональностью. Например, бот погоды получает данные о погоде с использованием внешнего API, бот-напоминалка реализует отложенную отправку сообщений, а бот рассылки отправляет сообщения всем пользователям, взаимодействовавшим с ботом.

В ходе выполнения данной работы был разработан программный прототип системы генерации простых Telegram-ботов на основе текстовых запросов пользователя. Реализованная система позволяет автоматически создавать Telegram-боты с базовой функциональностью, используя шаблонный подход и простую классификацию пользовательских запросов.

Реализация Telegram-бот-конструктора, принимающего сообщения от пользователя, основана на работе асинхронного обработчика сообщений handler, зарегистрированного в диспетчере Dispatcher основного генератор-бота. Данный обработчик отвечает за приём пользовательского запроса, управление состоянием диалога и запуск процесса создания нового Telegram-бота.

При получении сообщения система проверяет, находится ли пользователь в процессе создания бота. Если процесс ещё не начат, текст сообщения передаётся в модуль анализа запроса для определения типа требуемого бота.

```
@dp.message()
async def handler(msg: Message):
    uid = msg.from_user.id
    if uid not in user_state:
        bot_type = detect_type(msg.text)
        if not bot_type:
            await msg.answer("Не удалось определить тип бота")
    return
    user_state[uid] = {"type": bot_type}
    await msg.answer("Пришлите токен от BotFather") return
```

**Листинг 1 – Модуль обработки запроса**

Таким образом, генератор-бот реализует интерактивный сценарий взаимодействия с пользователем и обеспечивает пошаговое формирование параметров создаваемого бота.

Модуль анализа запроса, определяющего тип требуемого Telegram-бота, реализован в виде функции `detect_type`. Данная функция выполняет анализ текстового запроса пользователя и сопоставляет его с поддерживаемыми типами ботов на основе ключевых слов.

В текущей версии системы используется правило-ориентированный подход, что позволяет обеспечить простоту и предсказуемость работы конструктора на этапе MVP.

```
def detect_type(text: str):
    text = text.lower()
    if "рассыл" in text:
        return "broadcast"
    if "напомин" in text:
        return "reminder"
    return None
```

**Листинг 2 – Модуль анализа запроса**

Результатом работы функции является строковый идентификатор типа бота, который далее используется модулем генерации для выбора соответствующего шаблона.

Модуль генерации, создающий новый Telegram-бот на основе выбранного шаблона, использует метод `start_bot` класса `BotEngine`. Данный метод выполняет инициализацию нового экземпляра Telegram-бота, регистрацию обработчиков сообщений и запуск процесса опроса серверов Telegram.

В зависимости от выбранного пользователем типа бота, в метод передаётся соответствующая функция настройки шаблона.

```
class BotEngine:
    async def start_bot(self, token: str, handler_factory):
        bot = Bot(token=token)
        dp = Dispatcher()
        handler_factory(dp)
        asyncio.create_task(dp.start_polling(bot))
```

**Листинг 3 – Модуль генерации бота**

Использование шаблонов позволяет реализовать архитектуру, при которой один программный процесс обслуживает несколько Telegram-ботов, каждый из которых обладает собственной логикой обработки сообщений. Такой подход обеспечивает масштабируемость решения и упрощает расширение функциональности конструктора за счёт добавления новых шаблонов.

В результате выполнения работы были достигнуты следующие результаты:

- реализован механизм, принимающий текстовые запросы пользователя;
- разработан механизм определения типа бота на основе ключевых слов;

- создан набор шаблонов простых Telegram-ботов;
- продемонстрирована возможность автоматизации процесса создания Telegram-ботов.

Следует отметить, что представленная версия системы является прототипом и имеет ряд ограничений. В частности, анализ пользовательских запросов реализован в упрощённом виде и не учитывает сложные формулировки. Кроме того, система не выполняет автоматическое развертывание и запуск сгенерированных ботов.

Тем не менее, полученные результаты подтверждают целесообразность выбранного подхода и демонстрируют возможность дальнейшего развития системы. В перспективе возможно использование методов машинного обучения и нейросетей для более точного анализа запросов, расширение набора поддерживаемых ботов, а также автоматизация процесса развертывания и запуска сгенерированных Telegram-ботов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Telegram Bot API. Официальная документация. – URL: <https://core.telegram.org/bots/api> (дата обращения: 21.01.2026).

2 Aiogram 3.x Documentation. Асинхронный фреймворк для разработки Telegram-ботов на языке Python. – URL: <https://docs.aiogram.dev/en/dev-3.x/> (дата обращения: 20.01.2026).

УДК 004.42

Я.А. Сидорик;  
Н.Н. Пустовалова, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

#### КОНСТРУКТОР БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ POSTGRESQL

В настоящее время часто встречающейся проблемой является необходимость организовать информацию в структурированном виде. Это может быть актуально для менеджеров проектов, аналитиков, специалистов по качеству, начинающих разработчиков. Для решения задач учета, хранения результатов или анализа информации им нужна своя небольшая база данных. Но для создания базы требуется знание языка SQL и особенностей конкретной системы управления базами данных, например, PostgreSQL [1]. Специалист, который просто хочет быстро организовать свои данные, вынужден тратить недели на изучение основ. Это неэффективно и тормозит работу.

Конструктор баз данных способен устранить этот барьер с помощью интуитивно понятного графического интерфейса. Его задача –

превратить визуальное проектирование, похожее на рисование схемы на доске, в готовый, корректный программный код и рабочую базу данных. Пользователь должен думать о сути своей задачи, а не о синтаксисе команд.

При разработке конструктора соблюдались три ключевых принципа. Первый принцип – это визуализация. Пользователь может работать не с текстом запросов, а с графическими объектами. Таблицы выглядят как готовые блоки, связи между ними – как линии.

Второй принцип – использование шаблонов. Многие задачи являются типовыми. Поэтому в разрабатываемое приложение целесообразно встроить готовые схемы для распространенных случаев: например, структура для простого блога, для каталога товаров интернет-магазина или для учета задач в проекте.

Третий принцип – двусторонность. Приложение должно позволять не только создавать новое с нуля, но и открывать существующую базу данных, чтобы отобразить ее структуру в виде наглядной схемы, что превращает программу еще и в инструмент документирования и изучения.

Интерфейс приложения логично разделен на несколько основных модулей. В самом начале работы пользователь видит менеджер подключений. Это окно, где вводятся параметры для соединения с сервером PostgreSQL: адрес сервера, имя базы данных, логин и пароль. Удобно, что можно сохранить несколько настроек для разных проектов или серверов. После подключения открывается главное рабочее пространство. Это центральная часть программы, своего рода чистый холст. Здесь пользователь размещает таблицы, перетаскивая их мышью, может приближать или отдалять схему. Между таблицами рисуются наглядные линии, которые обозначают связи.

Рядом с холстом располагается панель инструментов с основными кнопками: «Добавить таблицу», «Добавить связь», «Выбрать шаблон», «Сгенерировать код», «Выполнить в базе данных». И, наконец, кнопка «Открыть редактор запросов» – это запасной вариант для сложных случаев.

Еще один важный элемент интерфейса – окно свойств. Оно динамически меняет свое содержимое в зависимости от того, что выбрано на холсте. Если выбрана таблица, в окне свойств можно изменить ее имя, добавить или удалить столбцы. Если выбран столбец, появляется возможность задать его тип, отметить, является ли он главным ключом, может ли содержать пустые значения. Все настройки делаются через привычные флажки и выпадающие списки.

Рассмотрим сценарии использования приложения. Первый сценарий – создание таблицы. Пользователь нажимает кнопку «Добавить таблицу» на панели инструментов. На холсте появляется новый прямоугольник с заголовком, например, «Таблица1». Пользователь сразу может переименовать ее во что-то осмысленное, например, «Товары». Затем в окне свойств он добавляет столбцы. Для каждого столбца вводит название, допустим, «Наименование», «Цена», «Наличие».

Далее нужно выбрать тип данных, которые имеют понятные названия: «Текст», «Число», «Флажок», «Дата». Программа сама сопоставит их с правильными типами PostgreSQL. Если пользователь отмечает столбец как «Главный ключ», программа автоматически позаботится о том, чтобы значения в нем были уникальными.

Второй, еще более важный сценарий, – создание связей между таблицами. Допустим, у нас уже есть таблица «Категории» с ключом «Код», и мы хотим связать с ней таблицу «Товары». Пользователь выбирает на панели инструментов режим «Создать связь». Затем он кликает сначала на столбец «Код» в таблице «Категории», а потом на таблицу «Товары». Программа делает всю сложную работу. Она анализирует типы данных и автоматически создает в таблице «Товары» новый столбец с подходящим именем, например, «КодКатегории». На холсте между таблицами рисуется линия связи. Кроме того, программа может спросить у пользователя, что делать с товарами, если категория будет удалена – удалять их вместе с ней или запрещать удаление. Все эти сложные правила реализуются автоматически.

Система шаблонов призвана ускорить начало работы. Часто пользователь не знает, с чего начать. Приложение предлагает ему выбрать готовую схему. Например, шаблон «Мини-блог» создаст на холсте три таблицы: «Авторы», «Статьи» и «Комментарии», уже связанные между собой правильным образом. Пользователю останется только переименовать их под свои нужды и добавить специфичные столбцы. Это не только экономит время, но и служит отличным обучающим примером. Когда схема готова, наступает самый ответственный момент – перенос ее в реальную базу данных. Здесь у пользователя есть два пути. Первый и самый простой – нажать кнопку «Выполнить в базе данных». Приложение само, в правильном порядке, сформирует и отправит на сервер все необходимые команды: создаст таблицы, пропишет связи, настроит ключи. Весь процесс будет отображен в журнале операций. Для дополнительного контроля всегда доступна вторая кнопка – «Сгенерировать код». Она открывает окно, в котором отображается весь текст программного кода, который будет выполнен.

Пользователь может его изучить, сохранить в файл или даже скопировать и выполнить в другой программе.

Важно, чтобы работа с базой данных была безопасной. Поэтому перед выполнением различных операций приложение сделает резервную копию структуры или, как минимум, выдаст четкое предупреждение о необратимости действий.

Несмотря на всю автоматизацию, предусматривается возможность для ручного управления. В любой момент пользователь может открыть встроенный редактор запросов, где можно выполнить любой специальный запрос, исправить мелкую ошибку или просто поэкспериментировать, т. е. приложение не ограничивает опытных пользователей, а дополняет их инструментарий.

Таким образом, приложение позволяет сделать мощные технологии баз данных доступными для широкого круга специалистов. В дальнейшем предполагается использовать для работы программные роботы [2], что сделает еще более удобным использование данного программного средства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. The PostgreSQL Reference Manual. Volume 1: SQL Language Reference // Network Theory Ltd., 2007. – 716 p.

2. Пустовалова Н.Н., Блинова Е.А. Программные роботы и базы данных // Информационные технологии. Материалы докладов 88-ой науч.-техн. конф. проф.-преподав. состава, научных сотрудников и аспирантов. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 16-18.

УДК 004.853

Н.В. Ржеутская, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

### **АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВЫХ ОТВЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NLP**

Современные образовательные и корпоративные информационные системы все чаще ориентируются на формирование прикладных компетенций, требующих не только воспроизведения фактов, но и глубокого понимания изучаемого материала. В этих условиях традиционные системы тестирования, основанные на закрытых вопросах, демонстрируют ограниченную эффективность. Они не позволяют адекватно оценить способность обучающегося формулировать рас-

суждения, аргументировать решения и использовать профессиональную терминологию.

Тесты с выбором ответа:

- оценивают память, а не логику;
- неспособность проверить глубину понимания материалы;
- высокая вероятность угадывания.

Ручная проверка развернутых ответов, в свою очередь, требует значительных временных затрат и подвержена субъективности. Это обуславливает актуальность разработки автоматизированных методов оценки знаний, способных анализировать текстовые ответы на семантическом уровне.

Целью данной работы является разработка и исследование адаптивного метода автоматизированного тестирования знаний, основанного на применении NLP-моделей для семантического анализа ответов пользователей.

Предлагаемый метод автоматизированного тестирования на основе семантического анализа представляет собой гибридный подход, сочетающий классическую структуру тестирования с интеллектуальной обработкой текстовых данных. Ключевым элементом является использование NLP-модели для автоматической интерпретации смысла ответа обучающегося [1].



**Рисунок 1– Алгоритм работы метода**

Алгоритм работы системы включает следующие этапы:

- формирование набора вопросов, классифицированных по уровням сложности;
- ввод пользователем текстовых ответов в свободной форме;

- формирование структурированного запроса для семантического анализа;
- получение количественной и качественной оценки от NLP-модели;
- взвешенное агрегирование результатов и формирование итогового вердикта.

Итоговый балл рассчитывается с использованием весовых коэффициентов, соответствующих уровню сложности вопросов, что позволяет учитывать вклад каждого задания в общую оценку.

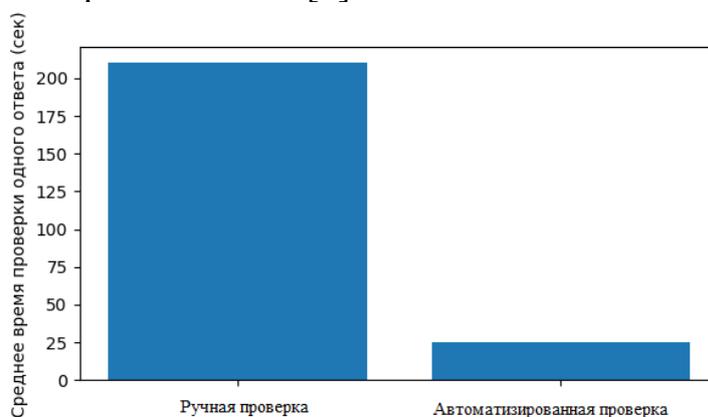
**Таблица 1 – Сравнительный анализ методов оценки знаний**

Критерий	Традиционные тесты	Предложенный метод
Форма ответа	Выбор варианта	Свободный текст
Глубина оценки	Низкая	Высокая
Субъективность	Отсутствует	Минимизирована
Масштабируемость	Высокая	Высокая
Обратная связь	Ограниченная	Развернутая

Функциональное и интеграционное тестирование системы подтвердило корректность работы всех компонентов. Было установлено, что система обеспечивает устойчивое взаимодействие с NLP-сервисом, корректный расчет итоговых оценок и формирование детализированной обратной связи для пользователей.

Для оценки эффективности предложенного метода был проведён сравнительный анализ времени проверки развернутых ответов.

Существующие методы тестирования заставляют выбирать между масштабируемостью и качеством проверки. Тесты с выбором ответа (Multiple Choice): быстрые и объективные, но поверхностные. Не оценивают глубину мысли. Развернутые ответы (Essays): глубокие, но проверка занимает 180-240 секунд на один ответ и страдает от субъективности преподавателя [2].



**Рисунок 2 – График эффективности проверки тестов**

График наглядно демонстрирует сокращение времени проверки более чем в 5 раз.

Разработанный метод автоматизированного тестирования знаний на основе семантического анализа текстовых ответов демонстрирует высокую практическую и научную значимость. Интеграция NLP-моделей позволяет перейти от формальной проверки к оценке смыслового содержания ответов, что существенно повышает качество контроля знаний.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на повышение интерпретируемости решений NLP-моделей и внедрение локальных специализированных языковых моделей для снижения зависимости от внешних сервисов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ржеутская Н.В. Сравнительная характеристика моделей и методов оценки знаний студентов // Цифровая трансформация. 2023. №4 (25). С. 32–41.
2. Гурин Н. И., Ржеутская Н. В. Структура семантической базы знаний для системы тестирования на естественном языке // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025 № 1 (278). С.56-61..
3. FastAPI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fastapi.tiangolo.com/ru/> (дата обращения: 07.01.2026).
4. OpenAI API Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://platform.openai.com/docs/api-reference> (дата обращения: 07.01.2026).

УДК 004.021

Е.А. Блинова, канд. техн. наук, зав. кафедрой ИСиТ,  
О.А. Нистюк, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

#### **МЕТОД СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В STEP-ФАЙЛАХ**

Стеганография – область науки, занимающаяся методами сокрытия факта передачи информации, часто применяемая для обеспечения конфиденциальности, защиты авторских прав, а также маркировки цифровых данных [1]. Стеганографические контейнеры представлены множеством различных форматов: это векторные и растровые изображения, звуковые и видео файлы, электронные текстовые документы. Для многих документов актуальна задача защиты авторских прав и подтверждения целостности документа.

Объектом исследования являются файлы векторных изображений, содержащих в своем описании объекты в виде совокупности нескольких функций, каждая из которых задана на каком-то множестве значений аргумента, то есть сплайна. Такие файлы широко используются в веб-графике, графическом дизайне, для создания иллюстраций с плавными кривыми, а также инженерных и архитектурных планов.

Одним из наиболее распространенных форматов в мире инженерии и промышленного дизайна является STEP (Standard for the Exchange of Product model data) – международный стандарт для обмена данными между различными системами инженерного проектирования. Главное назначение формата STEP – сохранить полную информацию о модели без потерь. Формат не является проприетарным, и может свободно использоваться различными приложениями, сохраняет точную геометрию, а также метаданные (материалы, допуски, структуру сборки, историю изготовления). Несмотря на то, что формально файл STEP – это изображение, по сути, это текстовый файл, который описывает модель на специальном языке EXPRESS. Формат поддерживает широкий спектр сущностей для отображения кривых, таких как базисные сплайны (`b_spline_curve_with_knots`), сплайновые поверхности (`b_spline_surface_with_knots`) и более простые элементы, например, окружность, эллипс, составные кривые и ломаные линии.

Основными преимуществами формата STEP являются точность, возможность использования в различном ПО и функциональность, так как файл может содержать и атрибутивные данные. В качестве недостатков указываются большой размер файла, отсутствие параметрической истории и сложность.

При разработке метода основными критериями эффективности являются незаметность (визуальные и функциональные изменения в 3D-модели должны отсутствовать), надежность (внедренная информация должна храниться при стандартном редактировании файла, например, перемещения элементов или изменении материалов) и вместимость (возможность внедрить достаточный объем данных, например, имя автора, дату создания или короткий идентификационный код).

Каждый `.step` файл строится на следующих основных сущностях:

1. `CARTESIAN_POINT` – это основная сущность для задания точки в пространстве тремя координатами ( $X, Y, Z$ ). Она является главным кандидатом для стеганографии, поскольку изменять наименее значимый бит в числе с плавающей запятой (или высокой точности) в координате визуально незаметно.

2. DIRECTION – задает вектор направления в пространстве. Менее популярна для вмешательства, но также содержит числа, которые определяют компоненты вектора.

3. VECTOR – определяет вектор через его направление (DIRECTION) и величину (LENGTH). Величина может быть числом.

4. VERTEX\_POINT – точка вершины геометрической фигуры. Ссылается на CARTESIAN\_POINT, не содержит непосредственно числовых значений.

Можно сделать вывод, что CARTESIAN\_POINT является лучшим вариантом для внедрения информации в файл. Обычно такие точки содержат три координаты, что позволяет вместить три бита сообщения, а каждая из этих координат имеет точность до 16 знаков после запятой, а потому изменения не будут заметны визуально.

Один из ключевых этапов разработки – реализация механизма проверки емкости контейнера. Метод должен учитывать максимальный объем данных, который может быть спрятан в конкретном STEP-файле на основе количества пригодных для вмешательства числовых полей. Если размер сообщения (включая служебные данные для декодирования) превышает эту границу, пользователю необходимо выбрать другой файл-контейнер. Это гарантирует корректность работы метода и избегает ошибок во внедрении и извлечении информации.

Разработка будет состоять из следующих ключевых этапов. Сначала будет проведен анализ структуры STEP-файла (стандарт ISO 10303-21) для идентификации секций и полей, наиболее подходящими для вмешательства – это числовые параметры с высокой точностью (например, координаты точек), где изменение младшего бита будет минимальным. Затем будет разработано ядро метода, которое реализует адаптированный LSB-подход для текстового представления чисел, учитывая необходимость сохранения синтаксиса файла. Для повышения криптостойкости был интегрирован дополнительный этап предварительной обработки сообщения с использованием симметричного шифрования и псевдослучайного распределителя на основе криптографического ключа для выбора мест вставки, что делает обнаружение факта вмешательства статистически сложнее [2].

Алгоритм внедрения информации:

1. Выделение массива со всеми точками из файла-контейнера.
2. Удаление из массива  $n$  точек, которые содержат целые числа.
3. Перемешивание точек на основе seed (ключ).
4. Разбиение сообщения на блоки и внедрение блока в точку.
5. Для каждого бита блока в соответствующей ему координате меняется два наименее значимых бита – последний заменяется на 1, предпоследний на бит сообщения.

6. Новый массив точек записывается в файл.  
Алгоритм извлечения информации:
  1. Выделение массива со всеми точками из файла-контейнера.
  2. Удаление из массива  $n$  точек, которые содержат целые числа.
  3. Перемешивание точек на основе seed.
  4. Формирование сообщения с предпоследнего бита каждой координаты.
  5. Обрезать часть данных по длине, равной полученному значению.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать вывод, что для реализации стеганографического внедрения в STEP-файлы наиболее оптимальным подходом является комбинация адаптированного метода LSB для работы с цифровыми координатами CARTESIAN\_POINT и дополнительных криптографических механизмов для повышения общей стойкости системы. Выбор именно данных координат основан их высокой точностью, широким распространением, а также минимальным визуальным влиянием на модель при манипуляции с младшими битами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Урбанович П.П. Защита информации методами криптографии, стеганографии и обфускации: учебно-метод. пос. для студ. вузов / П. П. Урбанович. – Минск: БГТУ, 2016. – 219 с.
2. Блинова, Е. А. Стеганографический метод на основе встраивания скрытых сообщений в кривые Безье изображений формата SVG (Steganographic method based on hidden messages embedding into Bezier curves of SVG images) (на англ. языке) / Е. А. Блинова, П. П. Урбанович // Журнал Белорусского государственного университета. Математика. Информатика – 2022. – № 3. – С. 68–83.

УДК 003.26

А.Н. Николайчук, ассист.;  
(БГТУ, г. Минск)

### **ОБНАРУЖЕНИЕ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ УГРОЗ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ IDS/IPS**

В современной сфере информационной безопасности защита данных традиционно фокусируется на криптографии (шифровании) и противодействии вредоносному ПО. Однако существует класс угроз, связанных со скрытием самого факта передачи информации – сетевая стеганография [1]. Стеганографические методы не нарушают целост-

ность системы, а используют избыточность сетевых протоколов для организации скрытых каналов связи. Актуальность данной темы обусловлена тем, что стеганографический трафик полностью соответствует спецификациям протоколов.

Сетевая коммуникация строится на базе модели TCP/IP, состоящей из четырех уровней. Стеганография может быть реализована на любом из них путем использования служебных полей заголовков:

- прикладной уровень (данные могут скрываться в текстовых полях, заголовках запросов или в структуре имен хостов);
- транспортный уровень (для передачи скрытых бит часто используются начальные номера последовательностей (ISN) или зарезервированные флаги);
- сетевой уровень (используются поля идентификации пакетов (IP ID), флаги фрагментации или поле «время жизни» (TTL));
- канальный уровень (работа ведется со служебными полями кадров внутри локальной сети).

Скрытый канал создается путем «инкапсуляции» (вложения) секретных данных в эти поля. Поскольку поля являются легитимными, пакет проходит через сетевое оборудование без препятствий [2].

Методы скрытой передачи данных принято разделять на три основные группы [3-6]:

- модификация содержимого пакетов (изменение значений в заголовках или полезной нагрузке, например, данные записываются в неиспользуемые биты IP-заголовка);
- модификация структуры передачи (не меняет сами пакеты, а управляет процессом их отправки);
- гибридные методы (сочетают в себе обе вышеуказанные техники).

Обнаружение таких угроз традиционными средствами (межсетевые экраны, антивирусы) крайне затруднительно, так как трафик выглядит легитимным, поэтому в данном докладе предлагается рассмотреть использование для этих целей системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS). IDS (Intrusion Detection System) – система, которая мониторит сетевой трафик или активность на хостах на предмет признаков атак или политик безопасности и генерирует оповещения, а IPS (Intrusion Prevention System) – активная система, которая не только обнаруживает, но и может автоматически блокировать подозрительную активность (например, разрывать соединение, отбрасывать пакеты).

Чтобы обнаружить стеганографию, IDS/IPS должна перейти от простого поиска известных вирусов (сигнатур) к анализу аномалий.

То есть, она должна знать «нормальный» профиль трафика и выбрасывать предупреждение при любых статистических отклонениях: неожиданный объем DNS-запросов, странные временные задержки, нетипичная длина пакетов.

Один из самых известных инструментов в этой области – Snort. Это мощный движок для анализа пакетов с гибкой системой правил. Основная логика будет такой: «Если в трафике есть такие-то характеристики (источник, порт, содержимое, частота), то выполни такое-то действие (залогируй, предупреди, останови)».

Для стеганографии ключевыми становятся правила, основанные на аномалиях, а не на конкретном коде. Они анализируют поведение, статистику, структуру.

В качестве примера был использован метод DNS-туннелирования [2]. Его суть заключается в передаче данных внутри DNS-запросов (запросов на поиск имени хоста). Вместо реального имени узла клиент отправляет серверу закодированную информацию в виде поддомена.

Был запущен клиент, написанный на языке python, использующий библиотеку scapy, передающий данные через DNS-туннель. На первом этапе Snort работал с базовым набором правил. Весь трафик был пропущен системой, так как он выглядел как стандартная активность по разрешению доменных имен.

На втором этапе были добавлены правила, направленные на поиск аномалий (рис. 1). В частности, анализировалась длина строки запроса в UDP-пакетах (порт 53). Был установлен порог срабатывания, если длина отдельной метки (части доменного имени) в запросе превышает 63 символа, что является нарушением стандарта и характерно для некоторых методов туннелирования.

После настройки правил система Snort зафиксировала попытку передачи данных и сгенерировала оповещения, в лог-файлах сохранена подробная информация: время инцидента, IP-адреса отправителя и получателя, а также структура аномального пакета. Таким образом, угроза была успешно идентифицирована на основе поведенческого анализа. Системы IDS/IPS, в частности Snort с адаптированным набором правил, являются практически применимым инструментом для выявления статистических и поведенческих аномалий, для которых нужно подбирать индивидуальный подход. Как показал пример с DNS-туннелированием, корректно настроенная система способна детектировать факт скрытой передачи данных на основе отклонений от нормальных сетевых профилей – таких как аномальная длина полей, частотные или временные характеристики трафика.

```
alert udp any any -> 192.168.0.7 53 (  
  msg:"DNS STEGANOGRAPHY: Long subdomain detected"  
  dsize:>12;  
  content:"|00 00|";  
  content:"|01 00|";  
  byte_test:1, >, 63, 12, relative;  
  sid:1000001;  
  rev:1;  
  metadata:service dns;  
)
```

**Рисунок 1 – Правило для поиска аномалии**

Таким образом, для комплексного противодействия стеганографии можно внедрять и совершенствовать методы анализа аномалий в существующие системы мониторинга безопасности. Перспективным направлением является развитие гибридных систем, сочетающих правила, основанные на экспертных знаниях о конкретных методах, с адаптивными алгоритмами машинного обучения для выявления неизвестных стеганографических каналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Урбанович П.П. Защита информации методами криптографии, стеганографии и обфускации. – Минск: БГТУ, 2016. – 220 с.
2. Zander, S. A Survey of Convert Channels and Countermeasures in Computer Network Protocol / S. Zander, G. Armitage, P. Branch // IEEE Communications Surveys & Tutorials – 2007. – V.9. – № 3. – P. 44–57.
3. Николайчук А.Н., Урбанович П.П. Использование полей заголовка протокола IP для создания скрытого канала передачи данных // Информационные технологии. Физика и математика: Материалы 89-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием): Белорусский государственный технологический университет. – Минск, 2025. – С. 43–46.
4. Николайчук А.Н. Сравнительный анализ методов сетевой стеганографии // VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2025», Минск, 3 – 5 декабря 2025 г. : в 3 т. Т. 1. – Минск: БГТУ, 2025. – С. 441–444.
5. Применения сетевой стеганографии для скрытия данных, передаваемых по каналам связи / О.Ю. Пескова, Ю. Г. Халабурда // Известия ЮФУ. Технические науки – 2012.
6. Handel, T., Sandford, M. Hiding data in the OSI network model / T. Handel, M. Sandford // In Proceedings of The First International Workshop on Information Hiding – 1996. – P. 23–38.

## **АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ WEB-ДОКУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ РАСТРОВОЙ ГРАФИКИ И МОДЕЛИ RGB**

Оригинальный контент может быть преобразован из одного формата графики в другой, без согласования с авторами. При различных изменениях и преобразованиях текстовых документов (являются контейнерами стеганографической системы) одной из важных проблем является растривание текста: контуры букв становятся нечеткими, а цвет по контуру переходит в градиент [1].

Текстовые документы в растровом формате необходимы для сохранения точного визуального представления контента без возможности его редактирования. Это особенно важно для официальных документов, сертификатов и договоров. Многие организации требуют предоставления документов именно в растровом виде, особенно когда речь идет об отсканированных подписях или юридически значимых копиях.

Формат PNG характеризуется (в сравнении, например, с JPG, TIFF, BNP) более высокой устойчивостью к цифровым шумам и хорошим балансом между размером стегоконтейнера и сохранностью внедренных данных.

Ранее был представлен метод для контроля целостности данных, защиты прав собственности на мультимедийную информацию, отслеживания распространения информации [2]. Он основан на изменении пространственной области документа-контейнера. Также были предложены реализующие его алгоритмы стеганографического преобразования, использующие в качестве контейнера элементы web-приложения на основе растровой графики. В качестве базового элемента контейнера, цветовые параметры которого модифицируются в модели RGB при осаждении информации, выступает пиксель изображения. Внедрение (извлечение) информации происходит в пикселях, имеющих одинаковое значение в одном или нескольких цветовых каналах. Особенностью разработанного метода является то, что процессы внедрения (извлечения) информации осуществляются при сравнительном анализе значений одного или двух цветовых координат базового пикселя и пикселя для внедрения. Псевдокод алгоритма внедрения, в соответствии с которым будут происходить преобразования, представлен в листинге 1.

Входные: сообщение  $m$ , web-документ  $c$ , опорный пиксель  $z_0$

Выходные: стегоконтейнер  $S$

- (1) Преобразовать web-документ  $c$  в файл растровой графики;
- (2) Расширить сообщение  $m$ ;
- (3) Подсчитать количество знаков  $n$  в расширенном сообщении  $m$ ;
- (4) Представить  $m$  в двоичном виде  $M$ ;
- (5) Определить начальные координаты встраивания;
- (6) Определить цветовой канал  $c_{RGB}$ ;
- (7) Определить цветовой канал  $c_{RGB}'$ , отличный от  $c_{RGB}$ ;
- (8) Определить ключевое значение канала  $Q$ ;
- (9) Определить значение цветового канала  $c_{RGB}'$  для пикселя  $z_0$ ;
- (10) Сформировать массив пикселей  $Z[]$  из изображения  $c$ ;
- (11) Определить размер  $l$  массива  $Z[]$ ;
- (12) если  $l \geq n + 1$  то
- (13) для  $i$  от 1 до  $n + 1$ :
- (14) Определить значение цветового канала  $c_{RGB}'$  для пикселя  $z[i]$ ;
- (15) если  $c_{RGB}'(z_0) > c_{RGB}'(z[i])$  то
- (16) если  $M[i] = 1$  то
- (17)  $c_{RGB}'(z[i]) = c_{RGB}'(z[i]) - Q$ ;
- (18) иначе если  $M[i] = 0$  то
- (19)  $c_{RGB}'(z[i]) = c_{RGB}'(z[i]) + Q$ ;
- (20)  $i = i + 1$ ;
- (21) Сохранить преобразованное изображение  $c$  как  $S$ ;

**Листинг 1 – Псевдокод алгоритма прямого преобразования**

Ключевым шагом алгоритма внедрения является выбор массива пикселей,  $Z$  ( $Z = \{z_i\}$ , здесь  $i \in [0, \text{length}(Z)]$ ). Алгоритм формирования массива  $Z$  представлен в листинге 2.

Входные: изображение-контейнер  $C$ , ключевой параметр  $Q$ , опорный пиксель  $z_0$ ,  $c_{RGB}$  – цветовой канал с совпадающими цветовыми параметрами пикселя,  $c_{RGB}'$  – цветовой канал для внедрения сообщения

Выходные: массив  $Z[]$ ;

- (1) Определить  $t$  – высота контейнера  $C$ ,  $r$  – ширина контейнера  $C$ ;
- (2) Определить значение пикселя  $z_0$  для канала  $c_{RGB}'$ ;
- (3) для  $j$  от 1 до  $t$ :
- (4) для  $n$  от 1 до  $r$ :
- (5) Определить значение пикселя  $c[j][n]$  для канала  $c_{RGB}$
- (6) если  $c_{RGB}(c[j][n]) == Q$  то
- (7) Определить значение пикселя  $c[j][n]$  для канала  $c_{RGB}'$

- (8) если  $c_{RGB}'(z_0) - 2 \cdot Q \leq c_{RGB}'(c[j][n]) \leq c_{RGB}'(z_0) + 2 \cdot Q$  то
- (9) если  $c_{RGB}'(z_0) - Q \leq c_{RGB}'(c[j][n]) \leq c_{RGB}'(z_0) + Q$  то
- (10) добавить пиксель  $s[j][n]$  в массив  $Z[]$ ;
- (11) иначе если  $c_{RGB}'(c[j][n]) \leq c_{RGB}'(z_0) - Q$  то
- (12)  $c_{RGB}'(c[j][n]) = c_{RGB}'(c[j][n]) - Q$ ;
- (13) иначе  $c_{RGB}'(c[j][n]) = c_{RGB}'(c[j][n]) + Q$ ;
- (14)  $n = n + 1$ ;
- (15)  $j = j + 1$ ;
- (16) Вернуть  $Z[]$ ;

### Листинг 2 – Формирование массива пикселей $Z$

Псевдокод алгоритм обратного преобразования представлен на листинге 3.

Входные: web-документ  $s$ ,  $c_{RGB}$  – цветовой канал с совпадающими цветовыми параметрами пикселя,  $c_{RGB}'$  – цветовой канал для внедрения сообщения, начальные координаты извлечения, ключевой параметр  $Q$ , длина сообщения  $n$

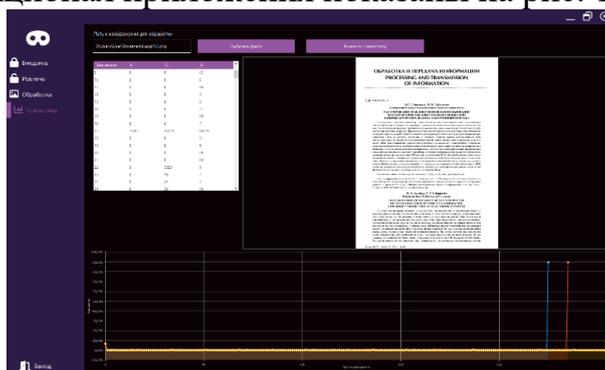
Выходные: извлеченное сообщение  $m$

- (1) Создать массив пикселей  $z[]$  из документа  $s$ ;
- (2) Создать пустой массив  $M[]$ ;
- (3) для  $p$  от 0 до 7:
- (4) Определить  $c_{RGB}'(z[p])$  – цветовой код пикселя  $z[p]$ ;
- (5) если  $c_{RGB}'(z_0) > c_{RGB}'(z[i])$  то
- (6)  $l = l \| 1$ ;
- (7) иначе  $l = l \| 0$ ;
- (8)  $p = p + 1$ ;
- (9) для  $p$  от 8 до  $8l$ :
- (10) Определить  $c_{RGB}'(z[p])$  – цветовой код пикселя  $z[p]$ ;
- (11) если  $c_{RGB}'(z_0) > c_{RGB}'(z[i])$  то
- (12)  $L = L \| 1$ ;
- (13) иначе  $L = L \| 0$ ;
- (14)  $p = p + 1$ ;
- (15) для  $p$  от  $l(8+1)$  до  $8L+7$ :
- (16) Определить  $c_{RGB}'(z[p])$  – цветовой код пикселя  $z[p]$ ;
- (17) если  $c_{RGB}'(z_0) > c_{RGB}'(z[i])$  то
- (18)  $M = M \| 1$ ;
- (19) иначе  $M = M \| 0$ ;
- (20)  $p = p + 1$ ;
- (21) Преобразовать двоичный массив  $M[]$  в строку  $m$ ;
- (22) Представить сообщение  $m$  в десятичном виде;
- (23) Вернуть  $m$ ;

### Листинг 3 – Псевдокод алгоритма обратного преобразования

Для реализации представленных алгоритмов данного метода было разработано программное средство.

Для реализации стеганографических алгоритмов описанного методов (внедрение/извлечение  $M$  и статистическая обработка стегоконтейнера) разработано специализированное приложение (рабочее название – *StegTool*) на основе языка программирования *Python* с использованием фреймворка *Kivy* и библиотеки *Pillow* для обработки изображений. Вид одного из диалоговых окон (в режиме сравнения двух изображений) и основной функционал приложения показаны на рис. 1.



**Рисунок 1 – Диалоговое окно приложения StegTool в режиме сравнения двух изображений**

Описаны алгоритмические особенности стеганографического метода. Представлены псевдокоды основных алгоритмов (прямое и обратное преобразование, формирование массива  $Z$ ). Представлено программное средство, реализующее предложенный метод. В программном средстве реализованы следующие функции: внедрение информации, извлечение информации, анализ изображения, выбранного в качестве контейнера. Данный функционал позволит не только провести стеганографическое преобразование, но и исследовать контейнер для улучшения эффективности и увеличения пропускной способности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шутько, Н. П. Моделирование стеганографической системы в задачах по охране авторских прав / Н.П. Шутько, Н.И. Листопад, П.П. Урбанович // Восьмая Междунар. научно-техн. конф. «Информационные технологии в промышленности» (ИТГ 2015) : тезисы докладов. - Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2015. – С. 30-31.

2. Савельева М. Г., Урбанович П. П. Метод стеганографического преобразования web-документов на основе растровой графики и модели RGB // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2022. № 2 (260). С. 99–107.

## ОБЗОР МЕТОДОВ СТЕГАНАЛИЗА ДЛЯ ВЕКТОРНЫХ СТГОКОНТЕЙНЕРОВ

Развитие технологий скрытой передачи требует совершенствования методов противодействия – стеганоанализа, направленного на выявление факта наличия скрытого сообщения в цифровых контейнерах. Векторные стегоконтейнеры, представленные форматами SVG, WMF, EPS, а также векторными данными геоинформационных систем, представляют особый интерес для исследователей ввиду широкого распространения и специфики представления данных.

В отличие от растровых изображений, векторные форматы хранят графическую информацию в виде математического описания объектов – координат точек, параметров кривых, атрибутов заливки и трансформаций. Это определяет принципиально иные подходы как к встраиванию информации, так и к её обнаружению.

Векторные форматы имеют ряд особенностей, существенных для стеганоанализа. Как отмечается в работе Хубера, существуют два основных подхода к встраиванию информации в векторные данные: джиттер – внесение минимальных изменений в координаты точек, и эмбединг – добавление дополнительных точек, несущих скрытую информацию[1].

Данные методы встраивания создают различные типы искажений. Джиттер изменяет статистические характеристики распределения координат и корреляционные связи между соседними элементами векторного объекта. Эмбединг порождает аномалии в структуре данных – появление избыточных точек, нарушение закономерностей в последовательности описания контуров.

Важно подчеркнуть, что векторные стегоконтейнеры, как и другие типы контейнеров, могут быть подвергнуты стеганоанализу на основе выявления статистических аномалий, однако специфика векторных данных требует разработки специализированных признаков, чувствительных к конкретным типам встраивания.

Методы стеганоанализа для векторных контейнеров можно разделить на три основные категории: статистические методы, методы на основе машинного обучения и специализированные структурные методы.

Статистический подход основан на анализе отклонений распределений характеристик векторных данных от эталонных моделей. Эффективным инструментом являются матрицы переходных вероятностей и цепи Маркова, успешно применяемые для анализа JPEG-изображений[2]. Для векторных данных аналогичный подход может быть реализован путём анализа последовательностей координат, углов между сегментами или кривизны линий.

Традиционный подход к стеганоанализу включает два этапа: ручное извлечение признаков и классификацию с использованием ансамблевых методов или метода опорных векторов (SVM) [3].

Метод опорных векторов остаётся востребованным инструментом стеганоанализа благодаря способности эффективно разделять классы в многомерном пространстве признаков. Исследования показывают, что SVM-классификаторы на основе корреляционных признаков позволяют достигать точности обнаружения свыше 90%. Для векторных контейнеров в качестве признаков могут выступать статистики распределения координат, параметры аппроксимирующих кривых, корреляция между соседними точками.

Современные исследования демонстрируют перспективность применения глубоких нейронных сетей, которые позволяют объединить этапы извлечения признаков и классификации в единый сквозной процесс. Сверточные нейронные сети (CNN) показали высокую эффективность при анализе растровых изображений. Для векторных данных актуальна разработка архитектур, способных обрабатывать нерегулярные структуры – графовые нейронные сети (GNN) и сети на основе трансформеров.

Учёт взаимосвязей между элементами векторного контейнера составляет основу корреляционных методов. Подход, основанный на построении сетей корреляции между пространственно-временными соседними элементами, успешно применяется для анализа видео с модуляцией векторов движения[4].

Для векторных форматов перспективно построение графов, отражающих топологию объектов: связи между точками контура, иерархию вложенных объектов, отношения между соседними геометрическими примитивами. Встраивание информации нарушает естественные корреляции, что может быть выявлено путём анализа весов рёбер в таких графах и распределения степеней вершин.

Оценка эффективности методов стеганоанализа проводится по нескольким метрикам: точность обнаружения, ошибки первого и второго рода, вычислительная сложность.

Согласно современным исследованиям, применение методов машинного обучения, особенно глубоких нейронных сетей, позволяет достигать точности обнаружения свыше 90% [5]. Для классических методов на основе SVM точность существенно зависит от качества разработанных и используемых признаков.

Важной тенденцией является применение генеративно-состязательных сетей (GAN) для повышения качества стеганоанализа. Такие сети могут использоваться как для генерации обучающих примеров, так и для непосредственного обнаружения стегоконтейнеров.

Обзор современных методов стеганоанализа показывает, что векторные стегоконтейнеры требуют специализированных подходов, учитывающих специфику представления данных. Наиболее эффективными являются методы машинного обучения – от классического метода опорных векторов до современных глубоких нейронных сетей. Статистические методы на основе матриц переходных вероятностей и корреляционного анализа сохраняют актуальность как инструмент извлечения признаков. Перспективы развития связаны с применением генеративно-состязательных сетей, графовых нейронных сетей и гибридных архитектур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Huber, W. A. Vector Steganography: A practical introduction / W. A. Huber // *Quantitative Decisions*. – 2002. – 8 p.
2. Прокофьева, А. В. Метод стеганоанализа JPEG-изображений на основе цепей Маркова и его применение в сочетании с различными алгоритмами машинного обучения / А. В. Прокофьева, А. Н. Шниперов // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 61–75. – DOI: 10.25205/1818-7900-2022-20-4-61-75.
3. Барановский, Г. В. Сравнение метода опорных векторов с методом генеративно-состязательных сетей в стеганоанализе / Г. В. Барановский, С. С. Бекарев, А. А. Гулис, Е. П. Шишов // *Компьютерные системы и сети : сборник статей 59-й научной конференции*. – Минск: БГУИР, 2023. – С. 391–392.
4. Ye, H. Motion vector-based video steganalysis using spatial-temporal correlation / H. Ye, W. Zhang, Y. Yao, C. Kong, H. Huang, N. Yu // *Proceedings of the 6th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*. – [S. l. : s. n.], 2013. – P. 148–153.
5. Yatsura, P. A Review of modern methods for steganalysis and localization of embedded data in digital images / P. Yatsura, D. Progonov // *Theoretical and Applied Cybersecurity*. – 2025. – Vol. 7, No. 1. – P. 91–103. – DOI: 10.20535/tacs.2664-29132025.1.328265.

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ УЯЗВИМОСТЕЙ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ И ПРОГРАММНЫХ БИБЛИОТЕК**

Криптография играет ключевую роль в обеспечении безопасности программного обеспечения, предоставляя важнейшие механизмы для гарантии конфиденциальности, целостности и подлинности данных. Наряду с криптографией, задачи защиты информации решает стеганография, которая обеспечивает скрытие самого факта передачи данных, при этом современные стеганографические методы всё чаще основываются на нейросетевых технологиях [1]. Однако правильное использование криптографических приложений представляет собой сложную задачу [2]. Повышение «криптографических сбоев» подчеркивает значимость методов обнаружения криптоуязвимостей. Это согласуется с исследованиями, которые выявили высокий уровень неправильного использования криптографических приложений [3].

Ошибки в реализации криптографических алгоритмов можно разделить на несколько категорий, каждая из которых требует особых подходов к обнаружению:

1. Уязвимости, ведущие к атакам по побочным каналам (Side-Channel Vulnerabilities). Данный класс уязвимостей возникает, когда реализация непреднамеренно раскрывает секретную информацию через физические параметры работы устройства: время выполнения, энергопотребление, электромагнитное излучение [4].

2. Уязвимости управления памятью. К этой категории относятся классические ошибки, такие как переполнение буфера, использование памяти после освобождения и двойное освобождение [2].

3. Логические ошибки и неправильное использование криптографических API. Данный класс включает в себя широкий спектр ошибок, связанных с нарушением логики работы протокола или некорректным использованием криптографических библиотек [3].

4. Проблемы генерации псевдослучайных чисел. Качество генератора псевдослучайных чисел (ГПСЧ) является критическим для стойкости многих криптосистем [5]. Перспективным направлением исследований в этой области является анализ процессов синхронизации нейросетевых структур, таких как Tree Parity Machine, которые могут служить основой для генерации случайных последовательностей и протоколов обмена ключами [6].

Традиционные подходы к поиску уязвимостей можно разделить на статические (SAST), динамические (DAST) и гибридные. Однако для обнаружения сложных ошибок в криптографических реализациях все чаще применяются методы машинного и глубокого обучения.

1. Традиционные методы статического анализа. Классические SAST-инструменты работают на основе сопоставления шаблонов и набора эвристических правил. Они эффективны для поиска простых ошибок, но имеют ряд существенных недостатков, таких как высокий уровень ложных срабатываний, ограниченная адаптируемость, неспособность к обнаружению сложных семантических ошибок [3,7].

2. Применение глубокого обучения для анализа представлений кода. Современные исследования в области применения Deep Learning для анализа кода фокусируются на способах представления исходного кода, понятного для нейронной сети, и выбора архитектуры для его обработки [7].

Код может быть представлен в различных формах:

- как текст (последовательность токенов) [2,8].
- как абстрактное синтаксическое дерево (AST) [8].
- как граф: комбинирует AST, граф потока управления (CFG) и граф зависимостей по данным (DFG). Именно такое представление позволяет эффективно выявлять сложные, контекстно-зависимые уязвимости [5, 8].

Помимо этого, архитектура нейронной сети может быть следующей:

- рекуррентные нейронные сети (RNN/LSTM) [2].
- трансформеры [2,8].
- графовые нейронные сети (GNN) [5,8].
- большие языковые модели (LLM/SLM): Современные исследования демонстрируют, что LLM, такие как GPT-4, способны не только обнаруживать, но и исправлять ошибки использования криптографических API [3,7].

На основе проведённого анализа можно сделать вывод, что применение нейронных сетей, в особенности графовых архитектур (GNN) и больших языковых моделей (LLM), открывает новые возможности для обнаружения сложных криптографических уязвимостей, которые не поддаются традиционным методам статического анализа.

В дальнейшем планируется разработка гибридного подхода к автоматизации обнаружения уязвимостей реализации в криптографическом ПО на основе комбинирования методов глубокого обучения и классического статического анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сазонова Д.В. Классификация средств стеганографического анализа на основе нейросетевых технологий / Д. В. Сазонова // Информационные технологии: материалы 89-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов с международным участием, Минск, 3 – 18 февраля 2025 г. - Минск: БГТУ, 2025.
2. Saroo Raj, R. B. Predicting Software Vulnerabilities with Deep Learning-Driven Static Code Analysis in Security and Cryptographic Systems /R.B. Saroo Raj [et al.] // Proceedings of the 2025 IEEE Conference on Artificial Intelligence and Security. – New York : IEEE, 2025. – P. 112–125.
3. Firouzi, E. Can generative AI detect and fix real-world cryptographic misuses? / E. Firouzi [et al.] // Journal of Systems and Software. – Amsterdam: Elsevier, 2025. – Vol. 210. – Article 112234.
4. Weissbart, L. J. A. Side-Channel Analysis with Deep Learning: An Evergrowing Ally in Hardware Security Evaluation: PhD Thesis / L.J. A. Weissbart. – Delft : Delft University of Technology, 2025. – 185 p.
5. Farhad, M. HYDRA: A Hybrid Heuristic-Guided Deep Representation Architecture for Predicting Latent Zero-Day Vulnerabilities in Patched Functions / M. Farhad [et al.] // arXiv preprint server. – 2025. – arXiv:2511.06220. – URL: <https://arxiv.org/abs/2511.06220> (дата обращения: 23.01.2026).
6. Сазонова Д.В. Особенности синхронизации нейронных сетей в распределённых системах / Д. В. Сазонова, П.П. Урбанович // Передовые технологии и инновации в образовании и науке для улучшения качества жизни и стимулирования устойчивого экономического роста : сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения – 2025», Минск, 3 – 5 декабря 2025 г. : в 3 т. – Минск : БГТУ, 2025. – Т. 1. – С. 530 – 534.
7. Bappy, A. H. Case Study: Fine-tuning Small Language Models for Accurate and Private CWE Detection in Python Code / Md. A. H. Bappy [et al.] // arXiv preprint server. – 2025. – arXiv:2504.16584. – URL: <https://arxiv.org/abs/2504.16584> (дата обращения: 22.01.2026).
8. Kumar A. Deep Learning-Based Cloud Security: Innovative Attack Detection and Privacy Focused Key Management / A. Kumar [et al.] // IEEE Transactions on Computers. – 2025. – Vol. 74, No. 6. – P. 1978–1989.

## **ИНТЕГРАЦИЯ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ПЛАТФОРМЕ 1С С ВНЕШНИМИ БАЗАМИ ДАННЫХ**

В условиях стремительного роста объемов информации использование корпоративных информационных систем и баз данных становится необходимостью для повышения эффективности работы организаций. В странах СНГ одними из наиболее популярных корпоративных решений являются программы платформы 1С. В процессе реинжиниринга возникает потребность в интеграции корпоративных информационных систем, построенных на платформе 1С, с внешними базами данных, такими как реляционные базы данных.

Целью данного исследования является изучение методов и технологий интеграции корпоративных информационных систем на платформе 1С с внешними базами данных, а также анализ их преимуществ, ограничений и практических аспектов реализации.

Платформа 1С обладает встроенными механизмами для работы с внешними источниками данных. Например, возможность использования конструкции ExternalData позволяет подключаться к внешним системам и получать необходимые данные. Кроме того, в 1С реализована поддержка подключения к внешним базам через протоколы ODBC и JDBC, что расширяет возможности обмена информацией.

Также широко применяются интеграционные решения через API, такие как REST и SOAP, позволяющие реализовывать обмен данными в режиме реального времени либо по расписанию. Внутренние компоненты 1С позволяют создавать web-сервисы, обеспечивающие интеграцию с внешними системами.

Первый и один из наиболее популярных методов – доступ к внешним базам данных через драйверы ODBC или JDBC.

Open Database Connectivity (ODBC) – это открытый стандартный API для доступа к системам управления базами данных. ODBC позволяет приложениям получать доступ к данным, хранящимся в различных базах данных, без необходимости знать их специфические особенности [1].

Java Database Connectivity (JDBC) – это стандартный API для языка Java, который обеспечивает механизм выполнения запросов SQL и получения результатов из базы данных [2].

Такой подход позволяет подключаться к различным реляционным базам данных (MySQL, PostgreSQL, MS SQL Server и др.) и вы-

полнять SQL-запросы прямо из 1С. Этот метод обладает простотой в реализации и высокой гибкостью, однако требует внимательного подхода к вопросам безопасности и производительности, так как прямое соединение с внешней базой увеличивает риск утечек или сбоев.

Для реализации подключения к внешней базе данных через ODBC в 1С необходимо настроить драйвер и подключение:

– «Панель управления» → «Администрирование» → «Источники данных ODBC»;

– создать системный DSN для базы данных MS SQL Server.

Для вывода данных в сообщении можно использовать процедуру при начале работы системы в модуле приложения 1С (запуск в режиме «Конфигурация»), пример которой представлен в Листинге 1.

```
Процедура ПриНачалеРаботыСистемы()
    Попытка
        Соединение = Новый СОМОбъект("ADODB.Connection");
        Соединение.Open("Provider=SQLOLEDB;Data Source= DESKTOP-
3JJ5S14;Initial Catalog=PrintingHouse;Integrated Security=SSPI;");
        Результат = Соединение.Execute("SELECT MaterialID, Title FROM
dbo.Materials");
        Вывод = "";
        Пока Не Результат.EOF Цикл
            ID = Результат.Fields("MaterialID").Value;
            Название = Результат.Fields("Title").Value;
            Вывод = Вывод + "ID: " + ID + ", Название: " + Название + Символы.ПС;
            Результат.MoveNext();
        КонецЦикла;
        Сообщить(Вывод);
        Результат.Close(); Соединение.Close();
    Исклучение
        Сообщить("Ошибка подключения к базе данных: " + ОписаниеОшибки());
    КонецПопытки;
КонецПроцедуры
```

**Листинг 1 – Процедура для подключения базы данных на SQL Server к корпоративной информационной системе на базе 1С**

Обработка ошибок и логирование позволяют своевременно обнаруживать и устранять проблемы, связанные с соединением или некорректными данными.

Второй способ – импорт и экспорт данных посредством файлов форматов CSV, XML, JSON. Этот метод предполагает периодическую синхронизацию между системами и подходит для сценариев, когда обмен происходит нечасто или когда необходима архивная фиксация.

Третий способ – использование web-сервисов и API. В этом случае обмен данными осуществляется через HTTP-запросы, что обеспечивает возможность обмена в режиме реального времени. Этот подход особенно актуален для интеграции с облачными системами.

Еще одна используемая технология – брокеры сообщений, таких как AMQP или MQTT. Она позволяет организовать асинхронный обмен данными между системами, что полезно при работе с большими объемами информации или в сценариях с высокой нагрузкой.

Практические сценарии интеграции могут включать синхронизацию данных с ERP-системами, системами складского учета или облачными хранилищами. Например, можно настроить автоматическую выборку данных о материалах из внешней базы и обновлять их в учетной системе 1С, что сокращает ручной труд. Для этого можно использовать модуль с содержанием, приведенным в Листинге 2.

```
Команда = Новый СОМОбъект("ADODB.Command");
Команда.ActiveConnection = *Соединение*;
Команда.CommandText = *ТекстЗапроса*;
Команда.Parameters.Append(*ПараметрДаты*);
НаборДанных = Команда.Execute();
НачатьТранзакцию();
Поиск = Справочники.Материалы.НайтиПоРеквизиту("ВнешнийID", ВнешнийID);
Если Поиск.Пустая() Тогда
    НовыйМатериал = Справочники.Материалы.СоздатьЭлемент();
    НовыйМатериал.Записать();
Иначе
    СуществующийМатериал = Поиск[0].ПолучитьОбъект();
    СуществующийМатериал.Записать();
КонецЕсли;
ЗафиксироватьТранзакцию();
```

**Листинг 2 – Пример кода для обновления данных в системе 1С в соответствии с внешней базой данных**

Обеспечение актуальности данных – важная задача, которая решается за счет настройки регулярных синхронизаций (например, по расписанию, Листинг 3) или внедрения событийных механизмов. Выбор метода определяет ключевые показатели эффективности интеграции: скорость обновления и актуальность данных.

Для синхронизации справочника материалов (~10 000 записей) оценка различных методов показывает:

– ручной файловый обмен (CSV): 5–15 мин, высокая латентность;

- автоматическая синхронизация по расписанию (ODBC): 10–60 с, актуальность в пределах интервала расписания;
- событийная синхронизация (REST): <5 секунд на изменение, актуальность в реальном времени.

```

Процедура ВыполнитьСинхронизациюПоРасписанию() Экспорт
    Настройки = РегистрыСведений.НастройкиСинхронизации. СоздатьНаборЗаписей();
    Настройки.Отбор.Параметр.Установить("ВидСинхронизации", "Материалы");
    Настройки.Прочитать();
    Если Настройки.Количество() > 0 Тогда
        Настройка = Настройки[0];
        Если Настройка.Активность Тогда
            Результат = СинхронизироватьМатериалы(Настройка.
ДатаПоследнегоВыполнения);
            Настройка.ДатаПоследнегоВыполнения = ТекущаяДата();
            Настройка.Записать();
            Если Результат.Ошибок > 0 Тогда
                ОтправитьУведомлениеАдминистратору("Ошибки синхронизации: " + Ре-
зультат.Ошибок);
            КонецЕсли; КонецЕсли; КонецЕсли;
    КонецПроцедуры

```

**Листинг 3 – Пример кода для синхронизации информационной системы на 1С с внешней базой данных**

Для настройки интеграции использованы методы, описанные в официальной документации платформы 1С:Предприятие [3].

Интеграция корпоративных информационных систем на платформе 1С с внешними базами данных является важной задачей, позволяющей объединить разрозненные источники данных и повысить их актуальность. Перспективы исследований связаны с развитием облачных технологий и повышением уровня безопасности данных.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Общие сведения об ODBC / SQL / SQL Server // Microsoft Learn [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/sql/odbc/reference/odbc-overview?view=sql-server-ver17> (дата обращения: 18.01.2026).
2. Oracle JDBC Developer's Guide, 19c (Май 2023) // Oracle Help Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.oracle.com/en/database/oracle/oracle-database/19/jjdbc/index.html> (дата обращения: 18.01.2026).
3. 1С:Предприятие 8.3. Руководство разработчика. В 2-х частях / Фирма «1С». – Москва : 1С-Паблишинг, 2023. – 864 с.

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ GAN-МОДЕЛИ ДЛЯ ОБФУСКАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОДА

Современные технологии машинного обучения и искусственного интеллекта являются мощным инструментом для создания эффективных механизмов в области безопасности и защиты данных. Однако, они также представляют собой серьезную угрозу, поскольку могут быть использованы злоумышленниками для осуществления атаки на конфиденциальность и целостность информации, в частности программного кода. Алгоритмы МО способны анализировать и обрабатывать большой объемов данных, в том числе – анализировать обфусцированный код: выявлять уязвимости, распознавать определенные паттерны проектирования и предсказывать методы защитных механизмов, восстанавливать функциональность кода. Это открывает возможности для реверсивной инженерии, позволяя злоумышленникам восстановить исходный код и использовать его в своих целях. Таким образом, актуальной является задача создания новых решений, обеспечивающих надежную защиту кода и сокрытие реализованного в нем алгоритма [1, 2].

Обфускация – это процесс преобразования программного кода в трудночитаемый формат, который сохраняет его функциональность, но затрудняет анализ. Нейронные сети могут генерировать и применять более эффективные методы сокрытия кода, повышая уровень его защиты, затрудняя реверсивную инженерию и работу существующих инструментов для анализа и восстановления интеллектуальной собственности [3].

Одним из эффективных подходов к решению задачи обфускации является использования генеративно-сопоставительных сетей (Generative Adversarial Network, *GAN*), которые могут применяться для создания обфусцированного кода, генерируя альтернативные версии программ. Сеть позволяет создавать уникальные структуры кода, которые сложно анализировать при помощи существующих инструментов для деобфускации. *GAN* состоит из двух нейронных сетей – генерирующей (генератор, *G*) и дискриминирующей (дискриминатор, *D*). Обе сети обучаются в состязательном режиме, где генератор пытается создавать новые данные, а дискриминатор – угадать, являются они реальными или поддельными [4].

В рамках данного исследования рассматривается применение *GAN* для обфускации программного кода на языке *JavaScript*.

Уровень безопасности программы оценивается эффективностью на основе таких метрик, как устойчивость к реверсивной инженерии, сохранение функциональности и производительность кода. Таким образом задачей *GAN*-модели является обучение генератора  $G$  на создание таких обфусцированных версий токенов кода, которые невозможно отличить от реального, используя  $D$ .

Архитектура *GAN* для обфускации имеет отличия от подобных решений для генерации и анализа изображений или текста. Кроме того, нужно учитывать особенности языка *JavaScript* (динамическая типизация, вложенные структуры, области видимости переменных), так как код, написанный на этом языке, предоставляется пользователям в явном виде. Следовательно, *GAN*-модель, построенная для обфускации *JavaScript*-кода, должна учитывать его структурированность, семантическую корректность и долгосрочные зависимости. Для этого используются методы токенизации, комбинации *LSTM* и *CNN*, *Attention*-механизм. Эти особенности архитектуры *GAN* делают ее адаптированной для решения задач по защите кода.

Поскольку *JavaScript*-код нельзя обрабатывать как обычный текст, то нужно учитывать его лексическую структуру и обрабатывать как структурированные токены. Для этого все пары файлов исходного и обфусцированного кода, на которых обучается модель, необходимо разделить на токены, используя специальную библиотеку *Pygments*, которая сгруппирует токены по типам (*KEYWORD\_*, *NAME\_*, *STRING\_LITERAL*, *NUMBER\_LITERAL*). Это поможет модели понимать структуру кода и обобщать паттерны. В *JavaScript* также возможны долгосрочные зависимости, где переменные используют значения, определенные ранее, должны учитываться синтаксические правила и области видимости переменных. Для этого используется *Bidirectional LSTM* для понимания контекста в обе стороны и *Attention*-механизм – для отслеживания различных зависимостей в коде.

Для формального описания нашей *GAN*-модели используются следующие элементы:  $X$  – пространство (множество) исходных *JavaScript*-кодов;  $Y$  – пространство (множество) обфусцированных исходных *JavaScript*-кодов;  $V$  – словарь токенов;  $T$  – максимальная длина последовательности токенов, полученная после токенизации *JavaScript* кода;  $\hat{Y}$  – пространство (множество) сгенерированных обфусцированных генератором *JavaScript*-кодов;  $P_{data}(x)$  – распределение реальных оригинальных кодов,  $x \in X$ ;  $P_{data}(y)$  – распределение реальных обфусцированных кодов,  $y \in Y$ ;  $P_G(y)$  – распределение кодов,

сгенерированных сетью GAN;  $G(x, \theta_G)$  – генератор, который преобразует векторы из скрытого пространства (представляет собой многомерное векторное пространство абстрактных важных характеристик данных) в последовательности токенов; параметры (в общем смысле) генератора  $G - \theta_G$ ;  $D(y, \theta_D)$  – дискриминатор, который различает реальные и сгенерированные токены кода; параметры дискриминатора обозначим  $\theta_D$ .

Каждое пространство исходных и обфусцированных *JavaScript*-кодов представляется как последовательность токенов и может быть выражен следующим образом, поэтому с учётом токенизации можем записать, что

$$x \in \mathbf{X}, V: x = x_1, x_2, \dots, x_s; y \in \mathbf{Y}, V: y = y_1, y_2, \dots, y_s.$$

Генератор принимает входной код  $x$  и генерирует обфусцированных код  $\hat{y}$ :

$$\hat{y} = G(x; \theta_G).$$

Входными данными дискриминатора являются как реальные обфусцированные коды  $y$ , так и сгенерированные коды  $\hat{y}$ , а выходным – вероятность того, что входной код является реальным. Если значение вероятности близко к 1:

$$D(y, \hat{y}; \theta_D) \rightarrow P(y=\hat{y}) \rightarrow 1,$$

то дискриминатор «считает» код реальным, а не сгенерированным.

Генератор разработанной *GAN*-модели использует архитектуру *Sequence-to-Sequence* концепции *Encoder-Decoder* с *Binary Cross-Entropy* в качестве функции потерь и *Attention*-механизмом – для преобразования исходного *JavaScript*-кода в его обфусцированную версию, обеспечивая сохранение функциональности и семантики при изменении синтаксиса. Архитектура *Sequence-to-Sequence* используется, когда длины входной и выходной последовательностей различаются, и состоит из следующих компонентов: *Embedding*-слой, который преобразует токены исходного кода в векторные представления; *Encoder* (*Bidirectional LSTM*; *LSTM* – Long Short-Term Memory, долгая краткосрочная память – разновидность архитектуры рекуррентных нейронных сетей) – создает контекстное представление всего кода и использующий двунаправленную обработку для учета контекста в обе стороны (состоит из двух *LSTM*-слоев); *Attention*-механизм (*Multi-Head Attention*) позволяет генератору улучшать качество сгенерированных данных, акцентируя внимание на наиболее значимых частях исходного кода; *Decoder*, построенный также на основе двух слоев *LSTM*, генерирует обфусцированную последовательность токенов; выходной

слой – использует два полносвязных слоя для оценки логитов для каждого токена.

Дискриминатор разработанной *GAN*-модели использует гибридную архитектуру, комбинирующую сверточные нейронные сети (*CNN*) и *LSTM* с *Binary Cross-Entropy* в качестве функции потерь. Эта структура позволяет эффективно анализировать обфусцированный код, в которой *CNN* необходим для обнаружения локальных паттернов обфускации (переименование переменных, изменение синтаксиса, удаление пробелов), а *LSTM* – для понимания глобальных паттернов обфускации (согласованность переименований по всему файлу, структурные изменения кода, долгосрочные зависимости между частями кода). Дискриминатор состоит из следующих компонентов: *Embedding*-слой – преобразует токены обфусцированного кода в векторное представление; *CNN* блок с тремя сверточными слоями с различными фильтрами; *LSTM* блок с двумя слоями – анализирует глобальный контекст для понимания структуры кода; выходной классификатор, состоящий из трех полносвязных слоев – определяет, является код реальным обфусцированным или сгенерированным генератором.

Модель *GAN* объединяет генератор и дискриминатор в одну модель  $GAN = (G, D)$ . Обе сети обучаются поочередно: дискриминатор получает реальный обфусцированный код (метка: 1) и сгенерированный от генератора (метка: 0) и обучается различать их; генератор стремится обмануть дискриминатор (генерирует код, который дискриминатор будет считать реальным) и использует *Teacher forcing* для соответствия реальным обфусцированным примерам.

При выполнении экспериментов для формирования набора данных с примерами *JavaScript*-кода использовано 50 пар, состоящих из файлов с исходным кодом и обфусцированными версиями. Исходный код включает различные функции, классы, операторы ветвления, циклы, математические операции и другое. Обфусцированные примеры были созданы с помощью онлайн-обфускаторов, таких как *JavaScript Obfuscator Tool*, *EvalPacker* и *JavaScript Obfuscator*.

После завершения обучения модели проведено тестирование для оценки процесса обфускации на небольшом *JavaScript*-файле *test\_1* размером 98 байт. Среднее время выполнения необфусцированного кода составило 2.28 мс. Эффективность модели оценивалась по следующим критериям [5,6]: устойчивость к реверсивной инженерии  $R$ , сохранение функциональности  $F$ , производительность  $O_p$ . Разработанная модель показала следующие результаты:  $R = 10\%$  – низкая степень защиты кода;  $O_p = 35\%$  – снижение производительности обфус-

цированного кода по сравнению с оригиналом;  $F = 100\%$  – полное сохранение функциональности программы после обфускации.

Разработанная модель пока демонстрирует ограниченную эффективность, ее дальнейшее совершенствование является перспективным. Модель сохраняет функциональность и контекст кода, обеспечивая согласованность переименований с использованием простых методов обфускации. Мы планируем увеличить размер обучающего датасета для лучшего обобщения изученных паттернов, усовершенствовать токенизацию и использовать абстрактные синтаксические деревья (AST) для глубокого понимания структуры кода. Целесообразно также комбинировать различные методы обфускации для повышения общей эффективности модели. Расширение возможностей модели являются ключевыми факторами для ее успешного внедрения в защиту кода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Урбанович П. П. Защита информации методами криптографии, стеганографии и обфускации: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2016. 220 с.

2. Paul C., Whitman J., El-Karim A., Nandakumar P., Ortega F., Zheng L. De-obfuscation Techniques Using Neural Networks // ResearchGate. URL: [https://www.researchgate.net/publication/391856178\\_De-obfuscation\\_Techniques\\_Using\\_Neural\\_Network](https://www.researchgate.net/publication/391856178_De-obfuscation_Techniques_Using_Neural_Network) (дата обращения: 28.11.2025).

3. Romanelli M., Chatzikokolakis K., Palamidessi C. Optimal Obfuscation Mechanisms via Machine Learning // arXiv preprint arXiv:1904.01059. 2019. DOI: 10.48550/arXiv.1904.01059.

4. Mirza M., Osindero S. Conditional Generative Adversarial Nets // arXiv preprint arXiv:1411.1784. 2014. DOI: 10.48550/arXiv.1411.1784.

5. Кантарович В. С., Урбанович П. П. Критерии эффективности алгоритмов обфускации и деобфускации программного кода и их сравнительный анализ на основе онлайн-обфускаторов // Беспилотные аппараты "БПЛА - 2025": сборник статей II международного форума по беспилотным аппаратам, Минск, 30 сентября – 2 октября 2025 г.: в 2 частях. Минск: БГТУ, 2025. Часть 1. С. 149–153.

6. Кантарович В.С., Урбанович П. П. Применение модели LSTM для обфускации программного кода // Передовые технологии и инновации в образовании и науке для улучшения качества жизни и стимулирования устойчивого экономического роста : сб. ст. VIII Международной научно-технической конференции «Минские научные чтения – 2025», Минск, 3 – 5 декабря 2025 г. : в 3 т. – Т. 2. Минск : БГТУ, 2025. С. 251 – 556.

Д.Д. Сувханов, преп. кафедры компьютерных наук,  
Предс. Совета молодых ученых (ИТИТ, г. Ашхабад, Туркменистан)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ И ИХ ОБРАБОТКА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ**

Современный мир генерирует огромные объемы данных, которые поступают из самых разных источников таких как социальные сети, устройства Интернета вещей (IoT), финансовых систем и других цифровых платформ. Поточковые данные представляют собой непрерывный поток информации, который необходимо обрабатывать и анализировать в режиме реального времени, чтобы своевременно принимать решения [1].

Искусственный интеллект и машинное обучение стали ключевыми технологиями для работы с большими данными. Благодаря своей способности автоматически выявлять скрытые закономерности и адаптироваться к изменяющимся условиям, эти технологии значительно ускоряют обработку данных и делают её более точной [2].

Цель данного доклада – рассмотреть возможности применения методов машинного обучения для анализа данных в реальном времени, выявить их преимущества, ограничения, а также обозначить перспективы развития в данной области.

Обработка больших данных в реальном времени представляет собой одну из самых сложных задач современной информационной технологии [3]. Характеристики больших данных – объем (Volume), скорость (Velocity) и разнообразие (Variety) – формируют основные вызовы, с которыми сталкиваются системы анализа.

Ежедневно в мире генерируются эксабайты информации. Например, платформы социальных сетей, такие как Facebook и X, обрабатывают миллионы сообщений и взаимодействий в секунду. Системы, работающие в реальном времени, должны быть способны справляться с такими объемами без потери производительности. Скорость, с которой данные поступают в потоковые системы, создает дополнительные трудности. Реакция на такие данные должна быть практически мгновенной, что требует минимизации задержек в обработке [4]. Источники данных могут быть крайне различными: структурированные (таблицы баз данных), полуструктурированные (JSON, XML) и неструктурированные (видео, изображения, текст). Учитывая разнообразность, системы должны быть гибкими и адаптируемыми.

Традиционные подходы обработки данных, основанные на пакетной обработке (batch processing), не могут удовлетворить потреб-

ности в реальном времени. Основные недостатки данного метода, это высокая задержка между поступлением и анализом данных, невозможность реагировать на аномалии или события, пока обработка не завершится. Использование ИИ и машинного обучения позволяет преодолеть эти ограничения, предоставляя более эффективные и интеллектуальные методы работы с потоками данных.

Искусственный интеллект и машинное обучение открывают новые горизонты для анализа данных в реальном времени. Они позволяют не только обрабатывать большие объемы данных с минимальными задержками, но и извлекать из них ценные информации.

Для обработки данных в реальном времени применяются различные методы машинного обучения и алгоритмы. Например, рекуррентные нейронные сети (RNN) подходят для анализа последовательностей данных, таких как временные ряды. Кластеризация помогает группировать данные в режиме реального времени. Градиентный бустинг используется для прогнозирования и классификации потоков данных. Для реализации систем машинного обучения используются мощные инструменты, такие как TensorFlow и PyTorch. Для разработки и обучения моделей машинного обучения используются библиотека Apache Spark MLlib, а для обработки потоков данных используются инструменты Apache Kafka и Apache Flink [5].

Основными преимуществами искусственного интеллекта в обработке данных является скорость обработки, адаптивность и высокая точность. Например, машинное обучение позволяет обрабатывать большие объемы данных за миллисекунды. Системы машинного обучения способны подстраиваться под изменения во входных данных. Использование обученных моделей обеспечивает точное выявление закономерностей и аномалий. Основными ограничениями искусственного интеллекта в обработке данных является выделение ресурсов, зависимость от данных и интерпретация. Например, для обучения и работы моделей машинного обучения необходимы значительные вычислительные мощности. Для работы моделей требуется качественный и разнообразный обучающий набор данных. Некоторые модели, например, глубокие нейронные сети трудны для объяснения, что ограничивает их применение в критически важных системах.

Использование искусственного интеллекта и машинного обучения для анализа данных в реальном времени продолжает развиваться, предоставляя новые возможности для оптимизации процессов и повышения эффективности. С внедрением квантовых вычислений обработка больших объемов данных станет еще более быстрой и эффективной. Квантовые алгоритмы, такие как квантовое машинное обучение, обещают значительно ускорить анализ сложных потоков данных.

Системы, использующие методы машинного обучения, становятся всё более автономными. Нейроморфные процессоры, имитирующие работу человеческого мозга, позволят создавать устройства, которые смогут анализировать потоковые данные на аппаратном уровне. Это обеспечит минимальную задержку обработки и снижение энергозатрат.

**Заключение:** Искусственный интеллект и машинное обучение стали неотъемлемой частью анализа больших данных, особенно в задачах, требующих обработки потоков информации в реальном времени. Эти технологии позволяют быстро и точно выявлять аномалии, тренды и паттерны. Повышать производительность систем и снижать затраты. Создавать новые решения для сложных задач в таких областях, как финансы, здравоохранение, интернета вещей и безопасность. Однако остаются вызовы, связанные с высокими вычислительными требованиями, качеством данных и интерпретацией моделей. Тем не менее, дальнейшее развитие технологий, таких как квантовые вычисления и нейроморфные системы, открывает огромные перспективы для более эффективного использования искусственного интеллекта и машинного обучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. "Deep Learning", MIT Press, 2016.
2. Chollet F. "Deep Learning with Python", Manning Publications, 2021.
3. McKinsey & Company: "Big Data and AI: Future Trends", 2023.
4. Apache Kafka Documentation: <https://kafka.apache.org/>
5. Apache Flink Documentation: <https://flink.apache.org/>

УДК 004.92

С.А. Евдокимова, доц., канд. техн. наук  
(ВГУИТ, г. Воронеж, Россия)

### **УЯЗВИМОСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ**

Компьютерное зрение – это область искусственного интеллекта, которая занимается разработкой алгоритмов и методов для анализа и интерпретацией визуальной информацией (изображения и видео) [1].

Компьютерное зрение и машинное (техническое) зрение часто используются как взаимозаменяемые термины, но между ними есть небольшие различия, хотя оба направления связаны с анализом и интерпретацией визуальных данных. Машинное зрение чаще всего при-

меняется в условиях контролируемой среды, где условия освещения, фон и положение объектов заранее известны, что упрощает задачу разработки алгоритмов и повышает надежность системы. Машинное зрение используют для поддержки производственного процесса, его автоматизации и уменьшения количества брака. Примерами применения технического зрения являются контроль качества, когда проверка деталей на наличие дефектов выполняется автоматически, определение положения и ориентации деталей, с которыми взаимодействуют промышленные роботы [2].

Компьютерное зрение предназначено для решения задач нахождения объектов на изображении, которые делятся на следующие виды:

- классификация – входное изображение пытаются отнести к одной определенной категории в зависимости от присутствия на нем характерных признаков;

- обнаружение объектов (или классификация с локализацией) – дополнительно к задаче классификации решается задача определение рамки, ограничивающей местоположение объекта на исходном изображении;

- сегментация – входное изображение делится на значимые сегменты или области, которые могут соответствовать отдельным объектам или их частям. Семантическая сегментация определяет принадлежность каждого пикселя какому-то классу, а сегментация экземпляров позволяет выделить отдельные экземпляры объектов;

- детекция объектов – находит объекты на исходном изображении посредством поиска координат ограничивающих рамок и классификации содержания рамок на множестве заданных ранее классов. При этом количество объектов на изображении заранее неизвестно.

Главную роль в компьютерном зрении играют нейронные сети, которые применяются для решения задач распознавания лиц, в робототехнике, автономном вождении, медицинской диагностике и т.д.

В компьютерном зрении используются следующие виды нейронных сетей:

- полносвязные нейронные сети (Fully Connected Neural Networks, FCNN) – каждый нейрон связан с каждым нейроном в следующем слое. Используются для решения задач классификации и прогнозирования;

- сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN) – используют сверточные слои для автоматического извлечения признаков из входных данных, представляют собой алгоритм глубокого изучения, который применяется для обработки изображений;

– рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Networks, RNN) - используют свою внутреннюю память для обработки последовательностей произвольной длины;

– генеративно-сопоставительные сети (Generative Adversarial Networks, GAN) - способны генерировать реалистичные образцы данных.

Успехи в области компьютерного зрения связаны с появлением и развитием архитектуры сверточных сетей [1]. В начале вручную проводилось выделение характерных признаков объектов, однако при изменении ракурса, освещенности и масштаба изображений качество распознавания ухудшалось. Сверточные нейронные сети (CNN) являются разновидностью нейросетей для обработки данных с сеточной структурой, которая имеется у изображений и видео, и автоматически извлекают признаки из входного изображения за счет применения фильтрации. CNN анализируют пиксели, которые находятся близко друг к другу и содержат непрерывную визуальную информацию – яркость и цвет.

Примерами сверточных нейронных сетей являются AlexNet, ImageNet, ResNet, U-Net и другие.

Однако системы компьютерного зрения имеют ряд уязвимостей информационной безопасности, связанных с использованием нейронных сетей и моделей искусственного интеллекта [3, 4]. Наиболее популярными атаками являются состязательные атаки (Adversarial Attacks), которые вносят небольшие изменения в исходные данные для принятия неправильного решения. Они делятся на модели, называемые «белым ящиком», когда злоумышленник полностью знаком с архитектурой и параметрами модели. Имея знания о внутренних слоях, их количестве, весовых коэффициентов, злоумышленник может рассчитать оптимальные возмущения для неправильного вывода.

Атаки «черного ящика» проводятся без прямого доступа к параметрам модели. В этом случае злоумышленник не знаком с моделью, поэтому он использует методы подбора, отправку запросов для поиска подходящих параметров, а затем обучает похожую копию модели для генерации враждебных примеров. Данные атаки менее эффективны, но чаще используются.

Атаки типа «серый ящик» являются промежуточным вариантом, когда злоумышленник имеет частичную информацию о модели.

Также атаки бывают целенаправленные, когда преследуется цель изменения вывода модели на требуемое решение, и нецеленаправленные, когда важно любое нарушение правильной работы модели.

Существует ряд популярных примеров входных данных, которые используются, чтобы обмануть модель [3-5]. Например, метод быстрого градиентного распознавания (Fast Gradient Sign method – FGSM) – простой метод атаки на основе градиента функции потерь, который генерирует враждебные примеры с минимальным отличием от исходного изображения путем незначительного изменения пикселей по всему изображению.

Атаки по глубокой ошибке (Deepfool attack) направлены на создание выборки, которая имеет минимальное евклидово расстояние от исходного изображения, и возмущения добавляются к изображению итеративно.

Состязательные атаки предоставляют существенный риск для систем компьютерного зрения, поскольку даже мелкие модификации входного набора данных могут радикально изменить поведение модели нейронной сети [5]. Для противодействия им следует применять методы обучения устойчивого восприятия, основой которых является создание моделей, нечувствительных к малым изменениям входных данных.

Метод состязательной подготовки (Adversarial Training) включает дополнительное обучение модели нейронной сети на специально подготовленных примерах, чтобы модель постепенно адаптировалась к подобным искажениям и демонстрировала повышенную устойчивость.

Другим способом улучшения устойчивости модели является метод Data Augmentation with Noise Injection, который использует для обучения слегка зашумленные данные. Реальные графические изображения могут иметь разные уровни цвета, яркости, несовершенства, поэтому более широкий диапазон данных для обучения позволяет сделать модель машинного обучения менее чувствительной к небольшим колебаниям или искажениям в данных.

Таким образом, для повышения безопасности систем компьютерного зрения необходимо использовать методы состязательной тренировки для повышения устойчивости к атакам, не применять открытые наборы данных для обучения, проводить регулярные аудиты данных и моделей, контролировать доступ к входным данным и параметрам модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро. – М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2013. – 752 с.
2. Евдокимова, С.А. Интеллектуальные технологии, применяемые для автоматизации процесса сборки изделий / С.А. Евдокимова, Д.В. Аверьянов // Моделирование информационных систем и техно-

логий : сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2024. – С. 297-303.

3. Survey of adversarial attacks and defense against adversarial attacks / A. Jain, S. Agarwal, A. Pareek, V. Singh // Darpan International Research Analysis. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 535-542.

4. Исследование и статистический анализ атак на нейронные сети в задачах компьютерного зрения / Л.И. Капитонова, А.А. Ушакова, Н.А. Шална, А.А. Сторожева // Политехнический молодежный журнал. – 2019. - № 2(31). – С. 5.

5. Data reduction for black-box adversarial attacks against deep neural networks based on side-channel attacks / H. Zhou [et al.] // Computers & Security. – 2025. – Т. 153. – С. 104401.

УДК 004.7:004.05

М.Х. Нурлыева, преподаватель, кафедры информационных технологий (Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары, Туркменистан)

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ**

В условиях активного развития цифровых технологий передача и обработка данных становятся базовыми элементами функционирования современных информационных систем. Практически все сферы деятельности – промышленность, экономика, наука, образование и государственное управление – опираются на эффективный обмен данными и их аналитическую обработку.

Рост объемов информации, усложнение информационных потоков и повышение требований к скорости и надежности передачи данных обуславливают необходимость внедрения новых технологических решений. В связи с этим исследование современных технологий передачи и обработки данных является актуальной научно-технической задачей.

Роль передачи и обработки данных в цифровых системах

Передача и обработка данных образуют основу цифровой инфраструктуры. Они обеспечивают взаимодействие между распределенными элементами информационных систем и позволяют преобразовывать исходные данные в полезную управленческую и аналитическую информацию.

Эффективность цифровых систем напрямую зависит от:

- пропускной способности каналов связи;
- надежности передачи данных;

- скорости и точности их обработки;
- уровня информационной безопасности.

Современные цифровые системы ориентированы на работу в режиме реального времени, что предъявляет повышенные требования к телекоммуникационным и вычислительным технологиям.

В настоящее время широко применяются различные технологии передачи данных, среди которых ключевое место занимают оптоволоконные и беспроводные сети. Оптоволоконные линии связи обеспечивают высокую скорость передачи информации и минимальные потери сигнала, что делает их основой магистральных сетей.

Беспроводные технологии, включая сети мобильной связи пятого поколения (5G), позволяют организовать гибкий и мобильный доступ к данным. Использование современных протоколов передачи данных способствует повышению эффективности сетевого взаимодействия и снижению задержек.

Методы обработки данных и вычислительные технологии

Обработка данных включает процессы хранения, структурирования, анализа и визуализации информации. В условиях роста объемов данных особое значение приобретают технологии распределенных вычислений и параллельной обработки.

К наиболее распространенным подходам относятся:

- обработка больших данных (Big Data);
- использование облачных вычислений;
- применение технологий машинного обучения и искусственного интеллекта.

Эти методы позволяют выявлять скрытые закономерности, прогнозировать развитие процессов и поддерживать принятие управленческих решений.

Концепция больших данных основана на работе с массивами информации, характеризующимися большим объемом, высокой скоростью поступления и разнообразием форматов. Для их обработки применяются специализированные программные платформы и инструменты аналитики.

Использование аналитических платформ позволяет повысить точность прогнозов, оптимизировать процессы и повысить эффективность функционирования информационных систем. Большие данные становятся стратегическим ресурсом цифровой экономики.

Надежность передачи данных является критически важным фактором устойчивости цифровых систем. Нарушения целостности, доступности или конфиденциальности информации могут привести к значительным экономическим и социальным потерям.

Основные меры обеспечения безопасности включают:

- криптографическую защиту данных;
- системы аутентификации и авторизации;
- резервирование каналов связи и данных;
- мониторинг и анализ сетевого трафика.

Комплексный подход к информационной безопасности позволяет минимизировать риски и повысить доверие к цифровым технологиям.

Интеграция передачи и обработки данных в отраслевых системах

В отраслевых информационных системах передача и обработка данных играют ключевую роль в обеспечении управления и мониторинга процессов. В промышленности они используются для автоматизации производства, в энергетике – для управления распределенными сетями, в транспорте – для оптимизации логистики.

Интеграция современных технологий передачи и обработки данных способствует формированию интеллектуальных систем управления и повышению эффективности отраслей экономики.

Перспективы развития технологий передачи и обработки данных

Перспективы развития данной области связаны с дальнейшим увеличением скоростей передачи данных, внедрением интеллектуальных сетей и расширением использования искусственного интеллекта. Ожидается рост значения квантовых коммуникаций и новых методов обработки информации.

Развитие данных технологий будет способствовать формированию устойчивой цифровой инфраструктуры и обеспечению долгосрочного социально-экономического развития.

Современные технологии передачи и обработки данных являются ключевым элементом цифровой трансформации. Их развитие обеспечивает эффективное функционирование информационных систем, повышает качество управления и способствует инновационному развитию экономики. В дальнейшем совершенствование данных технологий будет определять уровень конкурентоспособности цифровых систем и устойчивость их развития.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. – СПб.: Питер. 2021.
2. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания и компьютерные сети. – М.: Мир. 2020.
3. Марц Н., Уоррен Дж. Большие данные. Принципы и практика. – М.: Вильямс. 2019.
4. Столлингс У. Передача данных и компьютерные сети. – М.: Диалектика. 2022.
5. Гостев Р.А. Информационные технологии и системы обработки данных. – СПб.: Питер. 2021.

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ: ИНТЕГРАЦИЯ AR И VR В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС**

Виртуальная и дополненная реальность представляют собой современные технологии, которые соединяют физический мир с цифровыми элементами. Виртуальная реальность (VR) предлагает пользователям полностью вымышленное пространство, созданное с помощью компьютерных систем. В свою очередь, дополненная реальность (AR) – это слияние виртуального и реального миров, которая меняет наше восприятие действительности. [1]

Эти технологии кардинально трансформируют способы взаимодействия между людьми, предметами и услугами в различных отраслях. Их использование становится все более распространенным в таких сферах, как образование, промышленность, транспорт, медицина, научные исследования, моделирование и туризм.

Технологии дополненной и виртуальной реальности открывают новые горизонты в сфере обучения, способствуя кардинальным изменениям в образовательном процессе. Ниже представлены основные аспекты, подчеркивающие их потенциал и влияние на систему образования:

### **1. Интерактивное обучение**

Виртуальная реальность (VR) предоставляет возможность студентам «погружаться» в образовательные среды, будь то исторические события, научные эксперименты или сложные теоретические концепции, а внедрение игровых механик в образовательный процесс делает обучение более захватывающим и вдохновляющим, повышая мотивацию учащихся.

### **2. Эмоциональная вовлеченность**

Эмоциональная вовлеченность, обеспечиваемая технологиями дополненной и виртуальной реальности, делает процесс обучения более эффективным и увлекательным, помогая студентам не только лучше усваивать материал, но и развивать необходимые навыки для жизни в современном обществе. Эмоциональная вовлечённость организуется через погружение в контекст, развитие эмпатии, участие в ролевых играх, обратную связь в реальном времени, снижение стресса и тревоги и создание сообществ.

### **3. Персонализированное обучение**

Технологии позволяют адаптировать образовательный контент под индивидуальные потребности и возможности каждого учащегося,

что делает обучение более эффективным. Ключевыми моментами данного аспекта являются:

индивидуальные пути обучения, где студенты могут учиться в своём собственном темпе;

адаптивные технологии, где интеграция искусственного интеллекта в образовательные платформы может анализировать прогресс учащегося и автоматически подстраивать контент под его уровень знаний и навыков;

выбор контента и форматов, где студенты могут выбирать темы и форматы обучения, которые наиболее интересуют и соответствуют их стилю восприятия информации;

обратная связь на основе данных, где системы, использующие VR и AR, могут предоставлять искомую обратную связь, основанную на анализе данных о прогрессе учащегося, что позволяет им вносить коррективы в свои стратегии обучения и глубже осмысливать свои достижения;

интеграция личных интересов, что позволяют интегрировать интересы студентов в учебный процесс;

создание безопасной среды для ошибок, где учащиеся могут экспериментировать и делать ошибки в безопасной среде, что улучшает процесс обучения и уверенность в себе без страха последствий;

кросс-дисциплинарное обучение, где AR и VR дают возможность комбинировать знания из различных областей.

#### 4. Безопасное экспериментирование

С помощью VR студенты могут проводить опасные или сложные эксперименты в виртуальной среде, минимизируя риски и ошибки.

Основными моментами, подчеркивающие преимущества этого аспекта в контексте безопасного экспериментирования являются: минимизация рисков, свобода для ошибок, доступ к сложному оборудованию, моделирование реальных ситуаций, анализ данных и результатов, развитие критического мышления и навыков решения проблем, технология без ограничений физического пространства.

Безопасное экспериментирование через технологии VR и AR создаёт уникальные возможности для обучения, позволяя учащимся изучать сложные и потенциально опасные предметы без риска, обеспечивая высокий уровень вовлеченности и понимания.

#### 5. Визуализация сложных концепций

AR и VR помогают представить абстрактные и сложные идеи в наглядной форме, что облегчает их понимание. Визуализация сложных концепций через AR и VR делает обучение более эффективным и увлекательным, предоставляя учащимся возможность глубже понимать материал и развивать критическое мышление.

## 6. Доступ к удаленным ресурсам

Учащиеся могут участвовать в образовательных мероприятиях, находясь в любой точке мира, что расширяет доступ к знаниям и ресурсам. Доступ к удалённым ресурсам через AR и VR трансформирует образовательный ландшафт, позволяя учащимся обогащать свои знания и уделять внимание учебе с любым уровнем подготовки. Это делает образование более доступным, интернациональным и адаптивным к потребностям каждого студента.

## 7. Стимулирование критического мышления

Задачи в виртуальных средах могут способствовать развитию аналитических и критических навыков, необходимых для решения реальных проблем. Основными характеристиками данного аспекта являются: создание сложных сценариев, объектные исследования и оценка, ситуационные задачи, групповая работа и обсуждение, интерактивные тесты и задания, интерактивные тесты и задания, интерактивные тесты и задания, открытые образовательные задачи.

## 8. Сотрудничество и взаимодействие

Данный аспект указывает на то, что технологии дополненной (AR) и виртуальной реальности (VR) поддерживают совместное обучение, позволяя учащимся работать в группах и делиться опытом независимо от физического местоположения.

## 9. Интеграция с современными технологиями

AR и VR могут быть связаны с другими инновационными инструментами, такими как искусственный интеллект, большие данные, кросс-дисциплинарные приложения, развивающие игры и геймификацию, что усиливает их функциональность в образовательных процессах и делает обучение более адаптивным, интерактивным и доступным, готовя учащихся к вызовам и требованиям будущего.

## 10. Подготовка к будущей профессии

Погружение в реалистичные сценарии труда позволяет лучше подготовиться к требованиям современного рынка. Подготовка к будущей профессии с использованием VR и AR не только улучшает качество образования, но и подготавливает учащихся к реальным требованиям и вызовам в их профессиональной жизни.

Резюмируя вышеизложенное можно прийти к выводу, что технологии дополненной и виртуальной реальности создают новые возможности в образовательной сфере, позволяя учащимся добиться более глубокого понимания учебного материала и развивать важные навыки. Эти технологии обладают огромным потенциалом, и их применение может значительно повысить доступность, интерактивность и увлекательность учебного процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Папагианнис, Хелен Дополненная реальность. Всё, что вы хотели узнать о технологии будущего. / Пер. с англ. Михайлов В.Г.– М: Эксмо, 2020 – 220с
2. Джонатан Линовес Виртуальная реальность в Unity. / Пер. с англ. Рагимов Р.Н. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 316

УДК 004.67

А. Н. Колесенков, проф., д-р техн. наук  
(РГРТУ, г. Рязань, Россия)

### **АДАПТИВНЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ ПРИЗНАКОВ С УЧЕТОМ ИХ ИНФОРМАТИВНОСТИ**

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Современные информационные системы все чаще сталкиваются с необходимостью обработки данных из разнородных источников: визуальные изображения, аудиопотоки, текстовые описания, сенсорные показания, временные ряды. Однако эффективный синтез такой информации остается нерешенной проблемой [1].

Актуальность исследования обусловлена тремя ключевыми факторами. Во-первых, критическая потребность в точной диагностике в медицине. Во-вторых, необходимость повышения надежности систем умных городов. В-третьих, требования промышленности к качеству контроля.

#### **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Цель исследования – разработка адаптивного метода синтеза мультимодальных данных с динамическим взвешиванием признаков, обеспечивающего повышение точности и устойчивости к пропускам данных.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель оценки информативности модальностей на основе энтропийных и корреляционных метрик
2. Создать алгоритм динамического взвешивания признаков с учетом их текущей информативности
3. Реализовать программную архитектуру, обеспечивающую обработку данных в реальном времени
4. Провести экспериментальную верификацию метода на реальных наборах данных

5. Оценить практическую применимость в задачах медицинской диагностики и промышленного контроля

### **НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

Научная новизна работы заключается в следующих положениях:

1. Предложена оригинальная метрика комплексной информативности модальности, объединяющая энтропийную и корреляционную компоненты.

2. Разработан алгоритм динамического взвешивания с адаптивным окном анализа.

3. Создана архитектура гибридного синтеза с двойным уровнем адаптации: на уровне характеристик модальности и на уровне отдельных признаков, что обеспечивает устойчивость к частичным пропускам данных.

### **АНАЛИЗ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ**

Анализ современных исследований в области мультимодальной обработки данных выявил следующие ключевые проблемы [2]:

– несогласованность модальностей из-за различий в частотах дискретизации и шумовых помех;

– пропуски в данных из-за отказов датчиков и сбоях при передаче данных;

– неадаптивность весовых коэффициентов, не учитывающих контекст;

– вычислительная сложность;

– чувствительность к шуму из-за отсутствия устойчивых метрик информативности.

Существующие подходы можно классифицировать по трем основным направлениям [3]:

1. Раннее слияние – объединение признаков на входном уровне. Преимущества: сохранение межмодальных корреляций. Недостатки: высокая чувствительность к пропускам данных.

2. Позднее слияние – объединение результатов отдельных моделей. Преимущества: устойчивость к пропускам. Недостатки: потеря межмодальной информации.

3. Координационное обучение – совместное обучение с разделением внимания. Преимущества: баланс между точностью и устойчивостью. Недостатки: высокая вычислительная сложность.

Основной недостаток существующих архитектур – использование статических весовых коэффициентов, не адаптирующихся к текущей информативности модальностей [4].

### **МЕТОДОЛОГИЯ**

Предлагаемый метод включает четыре последовательных этапа:

1. Предварительная обработка и нормализация: для каждой модальности выполняется стандартизация признаков.
2. Оценка информативности: для каждой модальности рассчитывается комплексная информативность по предложенной метрике.
3. Динамическое взвешивание: вычисляются адаптивные веса для каждой модальности.
4. Гибридное слияние: комбинирование признаков с использованием двухуровневого взвешивания.

### **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ**

Реализованный программный модуль предоставляет следующие функциональные возможности:

1. Автоматическое определение модальностей при подключении новых источников данных
2. Онлайн-адаптация весовых коэффициентов
3. Обработка пропущенных значений
4. Параллельная обработка
5. Интеграция с популярными фреймворками через унифицированный API

Разработанный метод имеет высокую практическую значимость в трех ключевых областях [5]:

- Медицинская диагностика.
- Промышленный контроль качества.
- Системы умного города.

### **РЕЗУЛЬТАТЫ**

Эксперименты показали, что предложенный метод демонстрирует наилучшие результаты по точности и устойчивости к пропускам данных при сохранении приемлемой вычислительной сложности.

Полученные результаты демонстрируют значительное преимущество предложенного метода по всем ключевым метрикам. Средняя точность 89.5% превышает лучшие аналоги на 4.9%, что статистически значимо. Устойчивость к пропускам данных (снижение точности всего на 5.4% при 30% пропусках) объясняется адаптивным механизмом перераспределения весов: при потере одной модальности система автоматически увеличивает веса оставшихся информативных каналов.

Анализ временных характеристик показывает, что предложенный метод сохраняет приемлемую скорость обработки (47 мс на объект), что удовлетворяет требованию реального времени для большинства промышленных приложений.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе исследования разработан адаптивный метод синтеза мультимодальных данных на основе динамического взвешивания при-

знаков с учетом их информативности. Метод решает ключевые проблемы современных подходов: несогласованность модальностей, пропуски в данных и неадаптивность весовых коэффициентов [6].

Основные результаты работы могут быть использованы для дальнейших исследований в области адаптивной обработки мультимодальных данных, разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений и создания новых стандартов для обмена разнородными данными в критически важных приложениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лутошкин, И. В. Динамические модели экономических систем и методы их анализа : монография / И. В. Лутошкин. – Ульяновск : Ульяновский государственный университет, 2024. – 188 с. – ISBN 978-5-605-19111-7.

2. Корячко, В. П. Применение методов машинного обучения для классификации материалов на основе их ключевых характеристик / В. П. Корячко, С. Д. Викулин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2025. – № 92. – С. 132-145. – DOI 10.21667/1995-4565-2025-92-132-145. – EDN HSAQVN.

3. Пасичняк, В. Е. Интеграция физиологических и визуальных данных для улучшения точности определения эмоциональных состояний / В. Е. Пасичняк, А. Н. Колесенков // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2025 : Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 04–06 марта 2025 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2025. – С. 103-107.

4. Баранчиков, А. И. Реинжиниринг реляционных баз данных на основе кластеризации атрибутов и технологий интеллектуального анализа данных / А. И. Баранчиков, Е. Б. Федосова // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 86. – С. 156-161. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-86-156-161. – EDN DSULCT.

5. Gusev S. I. Geoinformation system architecture for complex analysis of hydrometeorological data / S. I. Gusev, A. N. Kolesenkov // Innovative methods of mathematics and physics in environmental and hydrometeorological research. St. Petersburg, 2025. – P. 249-254.

6. Каширин, И. Ю. Модели знаний для коррекции дрейфа данных в data Mining / И. Ю. Каширин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2023. – № 84. – С. 108-118. – DOI 10.21667/1995-4565-2023-84-108-118. – EDN NIXBLC.

## **Подсекция 8.2. «ПРОГРАММИРОВАНИЕ. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ»**

УДК 004.021

А.П. Некрасова, преп.-ст.,  
В.В. Смелов, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### **ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ НЕЛИНЕЙНОГО РАСКРОЯ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА КОМПЛЕКТЫ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВРЕМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЯХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

Задача плотного нелинейного раскроя плоских поверхностей на комплекты деталей относится к классу Cutting Stock Problem [1] и рассматривается в рамках направления Cutting and Packing Problem [2]. Она имеет высокую практическую значимость для предприятий легкой промышленности, мебельного производства, дерево- и металлообработки, где требуется максимальное использование материала при сохранении производственного ритма.

В отличие от классических постановок задачи раскроя, в реальных производственных условиях необходимо учитывать не только эффективность использования материала, но и ограничения по времени вычислений, что особенно важно при потоковой обработке большого числа поверхностей.

В работе рассматривается узел производственной цепочки [3], осуществляющий построение планов раскроя поступающих плоских поверхностей произвольной формы на однотипные комплекты деталей. Особенностью постановки является то, что форма и мера поверхностей заранее неизвестны и становятся доступными только в момент их поступления в узел раскроя. Лекала деталей заданы в виде простых полигонов с фиксированной кратностью в комплекте.

Качество функционирования узла оценивается по двум критериям: эффективности раскроя множества поверхностей и средней продолжительности раскроя одной поверхности.

Поскольку геометрические характеристики поступающих поверхностей и результат работы алгоритма носят стохастический характер, эффективность раскроя и временные затраты рассматриваются как случайные величины. В этой связи задача формулируется в виде системы вероятностных неравенств.

Для построения плана раскроя одной поверхности [4] используется недетерминированный оператор генерации, формирующий варианты размещения лекал внутри заданного полигона поверхности.

Каждый вариант удовлетворяет условиям непересекаемости деталей, их полного размещения внутри поверхности и достижения максимальной упаковки.

Для повышения качества решения выполняется ограниченное число попыток генерации, при этом сохраняется вариант с наибольшей эффективностью. Поиск может завершаться досрочно при достижении заданного порога достаточной эффективности.

Эффективность раскроя оценивается через количество полных комплектов деталей, которое может быть собрано по результатам обработки всего множества поверхностей.

Решение поставленной задачи включает разработку алгоритма генерации планов раскроя, выбор параметров, ограничивающих число попыток и допустимое время обработки, а также проведение серии численных экспериментов для статистического подтверждения выполнения вероятностных неравенств.

Предложенный подход позволяет обеспечить требуемую эффективность использования материала при соблюдении временных ограничений вычислений и может быть использован в автоматизированных системах управления производством.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Robert W. Haessler, Paul E. Sweeney, Cutting stock problems and solution procedures, *European Journal of Operational Research*, Volume 54, Issue 2, 1991, Pages 141-150, [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(91\)90293-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(91)90293-5).

2. Dyckhoff, H. A typology of cutting and packing problems / H. Dyckhoff // *European Journal of Operation Research*. – 1990. – Vol. 44. – P. 145-159.

3. Рациональный раскрой промышленных материалов / Л.В. Канторович, В.А. Залгаллер. – Новосибирск: Наука СО, 1971. – 320 с.

4. Л.В. Кантарович. Математические методы в организации и планировании производства. Изд-во ЛГУ, 1939 (воспроизведено в сб. «Применение математики в экономических исследованиях», М: Соцгиз, 1959).

## **ЕСТЕСТВЕННОЯЗЫКОВЫЙ ИНТЕРФЕЙС ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЗАПРОСОВ К БАЗЕ ДАННЫХ**

Современная индустриальная экономика характеризуется все более сложными взаимоотношениями внутри производственных объединений, что требует внедрения передовых систем поддержки принятия решений. Одной из ключевых проблем в управлении промышленными кластерами является разрыв между накопленными техническими данными и способностью экспертов в данной области анализировать их в режиме реального времени. Традиционно взаимодействие с реляционными базами данных требует знания специализированных языков запросов, таких как SQL, что создает когнитивный барьер для менеджеров и инженеров-технологов. В условиях динамичных изменений в производственных цепочках и необходимости быстрого планирования ресурсов зависимость от узкоспециализированного ИТ-персонала становится критическим фактором, снижающим скорость принятия решений и потенциальную прибыльность предприятий.

Развитие технологий больших языковых моделей открывает новые перспективы для создания интеллектуальных интерфейсов, способных преобразовывать запросы на естественном языке в структурированные машинные команды. Однако прямое использование стандартных моделей для генерации запросов к сложным промышленным базам данных часто сталкивается с проблемой галлюцинаций и низкой точностью учета специфических отраслевых ограничений. Чтобы обеспечить достоверность результатов, необходимо не только перевести текст в код, но и глубоко обогатить контекст модели знаниями о математической структуре конкретного предприятия и его технологических связях.

В данной работе предлагается концепция системы, в которой естественный язык выступает в качестве универсального средства взаимодействия, а точность выполнения запросов гарантируется использованием специализированных протоколов передачи контекста и многократных проверок на соответствие аксиомам промышленного кластера. Актуальность исследования обусловлена необходимостью цифровизации процессов планирования при переходе к индустрии четвертого поколения, где ключевым ресурсом является скорость извлечения актуальной информации из разнородных источников дан-

ных. Научная новизна подхода заключается в сочетании динамического самоанализа базы данных с помощью современных протоколов взаимодействия и модульной организации системных инструкций, которые преобразуют формальные математические правила во внутреннюю логику рассуждений модели.

Работа сосредоточена на методах обогащения запросов, которые позволяют моделям “понимать” не только синтаксис таблиц, но и физический смысл хранящихся в них взаимосвязей. Промышленный кластер рассматривается не просто как набор записей в базе данных, а как сложная система взаимосвязанных элементов, функционирующих по законам линейного равновесия и технологической субординации. Реализация такого интерфейса позволяет преобразовать пассивное хранилище данных в активные системы поддержки планирования, доступные для взаимодействия в режиме реального времени. Это создает основу для более прозрачной и адаптивной среды управления распределенными производственными мощностями, где точность математических расчетов сочетается с интуитивностью человеческого общения.

Архитектура разработанной программной системы основана на принципах многоуровневой оркестровки, где центральным звеном является модуль управления контекстом, который координирует взаимодействие между пользователем, лингвистической моделью и разнообразными источниками данных. Техническая реализация основана на языке программирования Python и использует современные асинхронные подходы для обеспечения высокой производительности при обработке запросов. Протокол Model Context Protocol был реализован в качестве основного механизма взаимодействия с базой данных PostgreSQL, позволяющего модели выполнять самоанализ структур таблиц в режиме реального времени, изучать типы данных и существующие ограничения без необходимости жесткого кодирования схемы в системных инструкциях. Это обеспечивает высокую адаптивность системы к изменениям в структуре промышленного кластера, позволяя агенту самостоятельно обнаруживать новые технологические цепочки или изменения в ассортименте продукции с помощью автоматизированного подсчета объектов и инструментов извлечения метаданных.

Параллельно с прямым доступом к реляционным таблицам архитектура интегрирует уровень интерфейса прикладного программирования на основе GraphQL, реализованный с использованием библиотек Graphene и Strawberry. Этот компонент действует как структурированный посредник, предоставляя моделям типизированный граф объектов, что значительно снижает вероятность генерации синтакси-

чески некорректных запросов и обеспечивает эффективный поиск связанных данных за одну итерацию. Эта гибридная среда доступа позволяет системе сбалансировать гибкость необработанных запросов с надежностью высокоуровневых абстракций, что имеет решающее значение для обеспечения надежности данных в задачах производственного планирования.

Особое внимание уделено методологии формирования системных инструкций, которая реализована посредством модульной композиции текстовых блоков. Вместо использования монолитных подсказок была разработана архитектура, сочетающая общее описание математической модели кластера с узкоспециализированными правилами для конкретных методов доступа к данным. Общая часть содержит формальные определения наборов участников, продуктов и технологических связей, а также основные аксиомы системы, такие как ограничения на коэффициенты матрицы затрат и условия разрешимости уравнений планирования. Специальные модули дополняют этот контекст правилами диалекта базы данных или функциями схемы GraphQL, что позволяет поддерживать согласованность знаний о предметной области при использовании различных моделей или методов поиска информации. Такая структура сводит к минимуму избыточность контекста и облегчает масштабирование системы при добавлении новых протоколов взаимодействия.

Процесс обработки запроса пользователя представляет собой итеративный цикл рассуждений, в ходе которого модель последовательно определяет потребность во внешних данных, выбирает соответствующий инструмент и синтезирует полученную информацию. При получении запроса, связанного с расчетом производственных планов или проверкой технологических ограничений, система инициирует обращение к внешним функциям для получения текущих значений векторов спроса или коэффициентов прямых затрат. Полученные результаты возвращаются в контекст модели, где они сравниваются с базовыми математическими аксиомами. При обнаружении противоречий, таких как нарушение условий технологической цепочки или превышение пределов допустимых параметров планирования, система формирует отчет о несоответствии на основе формальной логики модели, что исключает возможность предоставления интуитивных, но математически неверных выводов. Таким образом, программная реализация обеспечивает плавную интеграцию нейросетевых вычислений с традиционными методами детерминированного анализа данных.

Эффективность предложенного архитектурного решения подтверждается результатами сравнительного анализа производительности

сти различных языковых моделей при генерации структурированных запросов для промышленного планирования. Экспериментальное тестирование на наборе сценариев управления, включая проверку технологических аксиом и расчет показателей валового производства, продемонстрировало, что использование стратегии обогащения с помощью протокола Model Context и интерфейса GraphQL значительно снижает уровень семантических галлюцинаций по сравнению со стандартными методами генерации подсказок. Модели демонстрируют более высокую устойчивость к сложным синтаксическим конструкциям и точное соблюдение типов данных, что критически важно при работе с финансовыми и количественными показателями производственных цепочек. Наличие жесткого математического контекста в системных инструкциях позволяет системе не только извлекать данные, но и выполнять предварительную логическую проверку, блокируя вывод заведомо ошибочных результатов, противоречащих физическим законам функционирования кластера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Универсальность естественно языкового интерфейса для взаимодействия с различными типами программных интерфейсов приложений / Евченко И.В. // <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnost-estestvenno-yazykovogo-interfeysa-dlya-vzaimodeystviya-s-razlichnymi-tipami-programmnyh-interfeysov-prilozheniy>. Дата доступа: 09.01.2026.

2. Естественно-языковые интерфейсы интеллектуальных вопросно-ответных систем / Житко В.А., Вяльцев В.Н., Гецевич Ю.С., Кузьмин А.А. // <https://cyberleninka.ru/article/n/estestvenno-yazykovye-interfeysy-intellektualnyh-voprosno-otvetnyh-sistem>. Дата доступа: 11.01.2026.

УДК 004.8

Н.И. Белодед, доц., канд. техн. наук;  
Ю.Д. Лыкова, преп.-стажер  
(БГТУ, г. Минск)

### **МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ДЛЯ ЕСТЕСТВЕННО ЯЗЫКОВОГО ИНТЕРФЕЙСА**

Развитие современных интеллектуальных информационных систем неразрывно связано с совершенствованием способов взаимодействия человека и вычислительной техники. Естественно-языковые интерфейсы являются приоритетным направлением, так как позволяют минимизировать порог вхождения для конечного пользователя и

обеспечить получение структурированной информации в доступной форме. Основу функционирования таких систем составляет модель представления знаний, которая определяет не только структуру хранения фактов, но и логику их извлечения при обработке произвольных запросов. Традиционно в интеллектуальных системах применялись логические модели и фреймовые структуры, обеспечивающие единое описание свойств объектов и ситуаций [1]. Однако с появлением больших языковых моделей возникла необходимость в интеграции классических методов хранения данных с современными нейросетевыми технологиями обработки текста.

Современные нейросетевые модели обладают значительной лингвистической гибкостью, что позволяет им имитировать человеческий диалог и адаптировать стиль общения. Тем не менее, их практическое применение в экспертных областях – таких как юриспруденция, медицина или корпоративное управление – ограничено критическим риском генерации фактически недостоверной информации, известным как эффект галлюцинации. Для решения данной проблемы в работе рассматривается архитектура, основанная на методе дополненной генерации. Данный подход позволяет разграничить функции лингвистического синтеза и хранения верифицированных данных. Модель представления знаний в рамках такой архитектуры строится на четком разделении между вычислительным ядром и контролируемым вектором внешних знаний. Информация предметной области формализуется в виде структурированных объектов, что формирует жесткий базис достоверных фактов и позволяет актуализировать базу знаний без внесения дорогостоящих изменений в параметры самой нейронной сети.

Важным аспектом модели является использование семантических сетей и графов знаний, которые позволяют формально описывать структуру предметной области и навигацию по связям между понятиями [2]. В данной работе семантическая сеть интегрируется в векторное пространство, где каждый узел данных получает свое уникальное числовое представление. Это позволяет объединить классическую строгость структурированных данных с мощностью семантического анализа, обеспечивая высокую точность сопоставления запроса пользователя с имеющимися фактами. В отличие от простых поисковых систем, такой подход позволяет учитывать иерархию понятий и сложные отношения между объектами предметной области [3].

Связующим звеном между пользовательским запросом на естественном языке и формализованной базой фактов выступает слой векторизации. Процесс векторизации преобразует неструктурированный

текст в многомерные числовые массивы, которые фиксируют семантические зависимости и контекстуальные особенности слов. В результате каждый текстовый объект – будь то вопрос пользователя или описание факта в базе знаний – получает координаты в семантическом пространстве. Поиск релевантных сведений осуществляется на основе метода косинусного сходства, который признан одной из наиболее эффективных метрик для определения степени близости между текстовыми объектами в задачах обработки естественного языка.

Математический смысл метода косинусного сходства заключается в вычислении косинуса угла между вектором поискового запроса и векторами информационных объектов, хранящихся в базе. В отличие от измерения евклидова расстояния, данный метод фокусируется на направлении векторов, что позволяет нивелировать разницу в длине текстов и сосредоточиться на их смысловой идентичности. Минимизация угла между векторами свидетельствует о максимальном семантическом соответствии, что дает системе возможность эффективно распознавать синонимичные конструкции и сложные речевые обороты, не ограничиваясь простым поиском буквальных совпадений символьных строк. Это особенно важно при работе с технической или нормативной документацией, где одно и то же понятие может быть сформулировано различными способами.

Для обеспечения абсолютной достоверности формируемых ответов в алгоритм работы системы включена процедура обязательной логической фильтрации. На этапе сопоставления векторов вычисляется коэффициент релевантности: если максимальное значение косинусного сходства оказывается ниже установленного порогового значения, запрос классифицируется как выходящий за рамки имеющейся базы знаний. В такой ситуации процесс генерации свободного текста принудительно прерывается программным фильтром. Вместо формирования вероятностного ответа система генерирует стандартное сообщение об отсутствии подтвержденных данных и предлагает пользователю скорректировать параметры запроса. Данный механизм является ключевым инструментом верификации, предотвращающим подмену реальных фактов ложными утверждениями языковой модели.

Дополнительным преимуществом предлагаемой архитектуры является возможность полной локализации вычислительного процесса. Использование современных платформ для запуска языковых моделей и специализированных векторных баз данных позволяет обрабатывать конфиденциальную информацию внутри защищенного контура организации. Это исключает необходимость передачи данных на внешние облачные серверы, обеспечивая соблюдение требований ин-

формационной безопасности. Таким образом, интеграция структурированных моделей представления знаний, векторного поиска на основе косинусного сходства и механизмов дополненной генерации позволяет создавать масштабируемые и безопасные интеллектуальные интерфейсы, пригодные для эксплуатации в профессиональных экспертных системах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Методы представления знаний и фреймовые структуры: лекция. URL: [http://www.machinelearning.ru/wiki/images/1/1d/Lect\\_8\\_ai\\_md\\_v.pdf](http://www.machinelearning.ru/wiki/images/1/1d/Lect_8_ai_md_v.pdf) (дата обращения: 25.11.2025).
2. Семантические сети и обработка естественного языка; Knowledge Graph. URL: <https://www.osp.ru/os/2017/02/13052229> (дата обращения: 11.12.2025).
3. Методы представления информации в простых семантических сетях; классификация семантических сетей / О. В. Мосин [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, № 3. С. 382–393. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-predstavleniya-informatsii-v-prostyh-semanticheskikh-setyah> (дата обращения: 16.12.2025). DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-382-393.

УДК 004.77; 004.72

Е.А. Гончар ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## ОБЗОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ NDN СЕТЕЙ

NDN (Named Data Networking) [1–5] – это архитектура сети, которая ориентирована на данные, а не на их местоположение. В отличие от традиционных IP-сетей, где коммуникация основана на адресах устройств (IP-адресах), в NDN фокус смещается на сами данные и их имена. Это позволяет создавать более гибкие, безопасные и эффективные сети, особенно в условиях современного интернета, где запросы на контент играют ключевую роль.

Основные цели NDN:

1. Ориентация на контент: В NDN пользователи запрашивают данные по их именам, а не по адресам устройств. Это упрощает доступ к информации, особенно в условиях, когда данные могут быть доступны из множества источников.

2. Повышение безопасности: Данные в NDN подписываются на уровне архитектуры, что обеспечивает их аутентичность и целостность.

3. Эффективность: NDN позволяет кэшировать данные на промежуточных узлах сети, что снижает нагрузку на серверы и ускоряет доставку контента.

4. Устойчивость к изменениям топологии сети: поскольку данные идентифицируются по именам, а не по местоположению, сеть может адаптироваться к изменениям, таким как отказ узлов или изменение маршрутов.

Для исследований и разработки в области NDN было создано несколько специализированных инструментов, среди которых выделяются симулятор ndnSIM [6], эмулятор Mini-NDN [7] и универсальная среда моделирования OMNeT++ [8] с соответствующими модулями. Выбор конкретного инструмента целиком зависит от задач исследователя: нужно ли ему протестировать новый сетевой алгоритм на огромной топологии, отладить работу реального приложения или же визуализировать и изучить каждый аспект взаимодействия протоколов.

Симулятор ndnSIM является самым популярным инструментом для моделирования NDN и фактически признан стандартом в академической среде. Он реализован в качестве модуля для NS-3 – мощного симулятора с дискретно-событийным механизмом. Ключевое преимущество ndnSIM заключается в том, что он не просто имитирует концепции NDN, а использует реальный код ключевых компонентов архитектуры: библиотеки ndn-cxx и демона форвардинга NFD [9]. Однако это не запуск готовых бинарных файлов, а интеграция их кода для симуляции поведения, что обеспечивает высокую достоверность результатов. Симуляция работает не в реальном времени, а дискретно-событийно, что позволяет проводить эксперименты значительно быстрее, чем они протекали бы в реальности. Благодаря этому, а также поддержке параллельных вычислений с использованием MPI, ndnSIM способен моделировать очень крупные сети, включая тысячи узлов. Кроме того, наследуя возможности NS-3, он предоставляет готовые и хорошо проработанные модели для различных сред передачи данных, включая проводные и беспроводные технологии, такие как WiFi и LTE. Сбор и анализ данных в ndnSIM хорошо автоматизированы – доступны встроенные трассировщики и скрипты для пост-обработки логов. Тем не менее, у этого подхода есть и минусы. Сценарии для ndnSIM пишутся на языке C++, что может быть сложнее для исследователей, привыкших к скриптовому языку. Сами приложения также

необходимо разрабатывать на C++ с использованием библиотеки `ndn-sxx`, и для переноса реального приложения в симуляцию потребуется его адаптация и внесение изменений в код. Наконец, взаимодействие с симулированной сетью ограничено просмотром статистики – невозможно напрямую подключиться к процессу NFD для отладки.

Альтернативой симуляции выступает эмуляция, и главный инструмент здесь – Mini-NDN. Он построен на базе Mininet и представляет собой легковесный эмулятор, который запускает на одном физическом компьютере полноценную сеть NDN, где на каждом виртуальном узле работают реальные демоны – Named Data Networking Forwarding Daemon (NFD) и протокол маршрутизации NLSR. Mini-NDN использует сетевые пространства имен Linux для изоляции процессов и виртуальные Ethernet-соединения для связи между узлами. Параметры каналов (задержка, потери, пропускная способность) настраиваются с помощью утилиты Linux `tc` на виртуальных интерфейсах. Это означает, что эмулируемая сеть ведет себя почти как реальная, так как в ней выполняются неизменные бинарные файлы NDN. Главное достоинство Mini-NDN – возможность "бесшовного" переноса кода: приложения, написанные и отлаженные в эмуляторе с использованием клиентских библиотек на C++, Python, Java или JavaScript, можно без каких-либо изменений разворачивать на реальном тестовом стенде. Сценарии эмуляции пишутся на Python, что делает их более простыми и быстрыми в разработке. Кроме того, исследователь может напрямую интерактивно взаимодействовать с процессами NFD или NLSR на любом узле в ходе эксперимента, что дает уникальные возможности для отладки и мониторинга. Однако у эмуляции есть и недостатки. Mini-NDN работает в реальном времени, что ограничивает масштаб и скорость экспериментов по сравнению с дискретно-событийной симуляцией. Хотя он подходит для сетей среднего и крупного размера, с появлением кластерной версии, моделирование с тысячами узлов может быть затруднительным. Встроенных средств визуализации у Mini-NDN нет, а для сбора статистики (например, о потерях пакетов или задержках) исследователю необходимо самостоятельно настраивать сбор логов NFD и NLSR или использовать утилиты вроде `ndndump`, а затем писать собственные скрипты для их обработки. Кроме того, на данный момент поддержка беспроводных технологий в Mini-NDN находится в стадии разработки.

Третий инструмент, OMNeT++, стоит несколько особняком. Это не специализированное решение для NDN, а мощная среда дискретно-событийного моделирования с модульной архитектурой. Для моделирования NDN под нее разрабатываются отдельные фреймворки, такие

как `inbaverSim` или фреймворк для оценки NDN в Интернете вещей (IoT). `OMNeT++` позволяет собирать модель сети как конструктор из отдельных модулей, что дает исследователю непревзойденную гибкость в настройке протоколов и алгоритмов. Одним из главных его преимуществ являются великолепные инструменты визуализации и отладки, позволяющие наблюдать за работой сети в графическом интерфейсе вплоть до уровня отдельных пакетов и событий. Это делает `OMNeT++` идеальным выбором для глубокого академического изучения новых протоколов и механизмов NDN, где требуется детальное понимание каждого аспекта их работы. Однако, эта гибкость и детализация могут обернуться более высокой сложностью освоения и меньшей производительностью при моделировании очень больших сетей по сравнению с узкоспециализированным `ndnSIM`.

Таким образом, выбор инструмента диктуется конкретной задачей. Если ваша цель – исследование масштабируемости нового алгоритма маршрутизации в сети с тысячами узлов, тестирование стратегий кэширования или моделирование работы NDN поверх беспроводных каналов, ваш выбор – `ndnSIM`. Если же вы разрабатываете реальное NDN-приложение, хотите протестировать его в условиях, максимально приближенных к реальности, отладить взаимодействие компонентов, а затем легко перенести его на действующий стенд, вам идеально подойдет `Mini-NDN`. Наконец, для сложных исследовательских проектов, где требуется абсолютная прозрачность процессов, возможность детальной настройки протоколов и наглядная визуализация, наилучшей средой станет `OMNeT++` с его NDN-модулями. Каждый из этих инструментов занимает свою нишу, и вместе они формируют мощную экосистему для развития и внедрения архитектуры `Named Data Networking`.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jacobson V., Smetters D.K., Thornton J.D., Plass M.F., Briggs N.H., Braynard R. L. Networking named content // CoNEXT '09: Networking named content. In Proceedings of the 5th international conference on Emerging networking experiments and technologies, New York, 2009. P. 1–12.
2. Mastorakis S., Afanasyev A., Moiseenko I., Zhang L. `NdnSIM 2: An updated NDN simulator for NS-3`. NDN // Technical Report NDN-0028, Revision 2., Los Angeles, 2011, P. 1–8.
3. Zhang L., Estrin D., Burke J., Jacobson V., Thornton J. D., Smetters D. K., Study of Censorship in Named Data Networking. // *Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering: Future Information Technology*, 2016, vol. 2, P. 145–152. DOI:10.1007/978-3-662-47895-0-18

4. Zhang L., Afanasyev A., Burke J., Jacobson V., Claffy K. C., Crowley P., Zhang B. Named data networking. SIGCOMM, series 44, Computer Communication Review Named Data Networking, 2014, issue 3, P. 66–73.

5. Afanasyev A., Shi J., Zhang B., Zhang L., Moiseenko I., Yu Y., Wang, L. NFD developer's guide. // Technical Report NDN-0028, Revision 2, Los Angeles, 2016, P. 29–31.

6. Riley G. F., Henderson T. R. The ns-3 network simulator. Modeling and tools for network simulation, 2010, pp. 15–34. DOI:10.1007/978-3-642-12331-3\_2.

7. Budiana M. S. et al. Impact of the Content Store Scaling toward the LRU and FIFO Cache Replacements on NDN using Mini-NDN //2021 15th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA). – IEEE, 2021. – С. 1-5.

8. Varga A. OMNeT++ //Modeling and tools for network simulation. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. – С. 35-59.

9. Afanasyev A. et al. NFD developer's guide //Dept. Comput. Sci., Univ. California, Los Angeles, Los Angeles, CA, USA, Tech. Rep. NDN-0021. – 2014. – Т. 29. – С. 31.

УДК 004

Н.И. Белодед, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАЗОВАНИИ**

### **Показатели обучения.**

Учебный план в системе высшего образования определяет дисциплины, формы отчётности и компетенции, которые должен освоить выпускник. Современный результат обучения выражается не только в оценках, но и в сформированных компетенциях.

Компетенции формируются на основе государственных стандартов и требований работодателей. Они включают:

- Универсальные (УК) – коммуникация, критическое мышление, работа в команде.
- Базовые профессиональные (БПК) – умения, обеспечивающие профессиональную деятельность.
- Специализированные (СК) – углублённые знания по профилю.

– Социально-эмоциональные (СЭК) – стрессоустойчивость, мотивация, умение учиться всю жизнь.

Пример: специальность «Информационные системы и технологии» включает 63 компетенции, «Программная инженерия» – 61. Каждая дисциплина формирует определённые компетенции: так, курс «Основы алгоритмизации и программирования» развивает навыки применения ИКТ и парадигм программирования, а «Структуры данных» – работу с динамическими структурами.

Особое значение приобретают информационно-коммуникационные компетентности (ИКК): умение искать, анализировать и создавать информацию средствами ИКТ. Показателями их сформированности являются способность выявлять дефицит данных, критически оценивать источники и передавать результаты.

### **Цели обучения**

Образовательный процесс направлен на формирование у студентов:

- Эрудиции – общей осведомлённости в ключевых областях.
- Навыков – психомоторных и когнитивных действий.
- Компетентности – самостоятельного поиска и обработки информации.

### **Лекции и практические занятия**

Лекция остаётся основой обучения, но её ценность заключается не в повторении учебника, а в объяснении происхождения и значимости знаний. Эффективная лекция включает введение, мотивацию, изложение и обобщение. Для активизации студентов применяются тесты и вопросы.

Практические занятия позволяют студентам самостоятельно объяснять материал и исправлять ошибки. Эрудиция формируется через лекции, навыки – через выполнение заданий, компетентность – через осознанное применение знаний.

### **Роль преподавателя**

Качество обучения во многом зависит от преподавателя. Его эрудиция, педагогические навыки и личные качества определяют интерес студентов и эффективность подготовки специалистов.

### **Диагностика успеваемости**

Контроль знаний включает предварительный, текущий, тематический, рубежный, итоговый и выпускной этапы. Используются экзамены, зачёты, контрольные работы, семинары и отчёты по практике.

Недостатки традиционных методов:

- различие требований преподавателей;
- субъективность оценивания;

- перегруженность проверкой;
- отсутствие единых стандартов;
- нарушения академической честности (шпаргалки, списывание, использование нейросетей).

Современные условия требуют внедрения прогрессивных форм контроля: тестирование, проверка остаточных знаний, единые критерии оценки, диагностика практических навыков. Это делает процесс проверки знаний более прозрачным и объективным.

### **Интегрированная система оценки деятельности обучаемых и обучающихся**

Современные образовательные учреждения стремятся повысить конкурентоспособность выпускников, что требует новых подходов к обеспечению качества образования. Важным инструментом становится объективизация контроля знаний и умений, реализуемая через интегрированную информационную систему оценки знаний (ИИС), основанную на балльно-рейтинговой модели. Она активизирует учебную деятельность, повышает ответственность студентов и формирует мотивацию к освоению новых навыков.

#### **Цели и задачи ИИС**

Повышение качества учебной и научной работы студентов за счёт комплексной оценки и постановки образовательных задач. Основные задачи:

- повышение мотивации студентов через дифференцированную оценку;
- внедрение модульной технологии и организационной чёткости;
- стимулирование самостоятельной и исследовательской работы;
- создание объективных критериев отбора для магистратуры и аспирантуры;
- повышение компетентности преподавателей в управлении качеством образования;
- укрепление академической мобильности и конкурентоспособности выпускников.

#### **Реализация и структура**

Для внедрения ИИС необходима единая модульно-рейтинговая система, балльная модель с учётом трудоёмкости дисциплин, структурирование содержания на модули с измеряемыми результатами, а также автоматизированная подсистема обработки информации.

Студенты получают академический рейтинг, который учитывает накопленные баллы, самостоятельную работу и дополнительные до-

стижения. Рейтинг открыто доступен студентам, преподавателям и руководству, что обеспечивает прозрачность и обратную связь.

Структура подсистемы включает три уровня:

- 0-й уровень – корпоративная серверная часть;
- 1-й уровень – локальные подсистемы по функциональному признаку;
- 2-й уровень – блоки, реализующие конкретные функции обслуживания учебного процесса.

ИИС использует интегрированный показатель, включающий посещаемость, дополнительные баллы и итоговую оценку.

#### **Положительные и отрицательные стороны**

Преимущества системы:

- активизация студентов в течение всего семестра;
- объективность оценивания;
- возможность регулировать темп обучения;
- упрощение работы преподавателя при выставлении итоговой оценки.

Недостатки:

- студенты, не работавшие в семестре, не могут получить зачёт до экзамена;
  - необходимость дополнительных мер по работе с неуспевающими;
  - пока рано говорить о полной эффективности новой шкалы
- требуется апробация на нескольких курсах.

#### **Сравнительная таблица методов контроля**

<b>Критерий</b>	<b>Традиционные методы</b>	<b>Иновационные методы</b>
Форма проверки	Экзамены, устные опросы, контрольные работы	Тестирование, рейтинговая система
Объективность	Субъективность преподавателя	Единые критерии, автоматизация
Надёжность результатов	Возможны искажения (шпаргалки, списывание)	Цифровые системы, постоянный контроль
Оценка навыков	Ограничена теорией	Включает практику и компетенции
Сравнимость	Трудно сопоставить результаты вузов	Унифицированные базы данных
Нагрузка преподавателя	Высокая, ручная проверка	Автоматизация, снижение рутинной работы

На рисунках 1 и 2 представлен интерфейс информационной системы и выходной отчет ее работы – интегрированный показатель оценки успеваемости студентов.

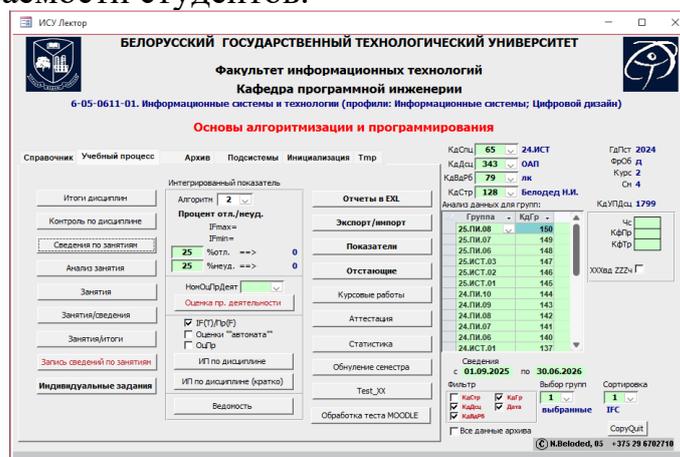


Рисунок 1 – Интерфейс ИИС

### Интегрированный показатель успеваемости студентов

Специальность: **25.ИСТ**

Курс: **1**

Обучение: **Д**

Сведения с **01.09.2025** по **30.06.2026**

Дисциплина: **Основы алгоритмизации и программирования**

IF = Пс+Дп+Оц  
 Пр - Баллы за практику  
 Пс - Посещение  
 Дп - Дополнительные баллы  
 Оц - Основная оценка  
 П - Всего баллов  
 НП - Поопуски по н/в. причинам  
 УП - Поопуски по ув. причинам  
 О - Оценка практической деятельности

Гр	ФИ	FCS	Пс	Дп	Оц	П	НП	УП	(Алг.-2 (25 - 25))	289 - 216	1 / 1	15.01.26						
1	25.ИСТ.01 Нестерович Максим	9	480	44	272	164			62	25.ИСТ.03 Храбрый Алексей	5	232	44	51	137			
2	25.ИСТ.02 Болвах Алексей	9	404	44	136	225			63	25.ИСТ.02 Подобед Илья	5	231	44	51	136			
3	25.ИСТ.02 Сергеев Андрей	9	380	44	188	150			64	25.ИСТ.01 Лапотко Алена	5	231	41	72	118	6	2	4
4	25.ИСТ.02 Зеленяк Никита	9	342	44	153	145			65	25.ИСТ.03 Кудравец Анастасия	4	227	42	52	133	4	2	2
5	25.ИСТ.02 Назарчук Виктория	9	338	44	146	148			66	25.ИСТ.01 Дайнеко Ярослав	4	225	42	55	128	4	4	
6	25.ИСТ.02 Мурашко Андрей	9	316	44	64	208			67	25.ИСТ.03 Немчинок Кирилл	4	224	44	46	134			
7	25.ИСТ.01 Упанов Артём	9	316	44	119	152			68	25.ИСТ.03 Маркузов Федор	4	221	44	48	129			
8	25.ИСТ.03 Мицкевич Кирилл	9	313	44	119	150			69	25.ИСТ.01 Маковский Прохор	4	216	44	38	134			
9	25.ИСТ.03 Воронько Артём	9	311	44	116	151			70	25.ИСТ.01 Шило Никита	4	216	44	52	120			
10	25.ИСТ.01 Иванов Максим	9	311	42	120	143	4	2	71	25.ИСТ.02 Иютченко Иван	3	215	44	18	153			

Рисунок 2 – Интегрированная оценка успеваемости по дисциплине

### Эффективность комплексного решения

ИИС обеспечивает постоянный контроль и выявление студентов с низкой успеваемостью, позволяя корректировать учебный процесс. Рейтинг выступает инструментом обратной связи и создаёт мотивирующую образовательную среду.

Интегрированная информационная система (ИИС) рейтинговой оценки показателей применима как к студентам, так и к преподавателям. Она обеспечивает постоянный контроль текущей успеваемости и позволяет отслеживать формирование компетенций по различным дисциплинам на протяжении всего периода обучения. Система фиксирует не только оценки, но и динамику развития компетенций, отражая их рост или снижение в разные временные интервалы.

Компетенции могут быть представлены в виде дополнительного вкладыша к диплому выпускника. Для работодателей такая информация зачастую более значима, чем традиционные оценки за зачёты или

экзамены, поскольку демонстрирует реальный уровень профессиональной готовности специалиста.

Современные образовательные учреждения стремятся повысить конкурентоспособность выпускников, что требует новых подходов к обеспечению качества образования. Важным инструментом становится объективизация контроля знаний и умений, реализуемая через ИИС, основанную на балльно-рейтинговой модели. Она активизирует учебную деятельность, повышает ответственность студентов и формирует мотивацию к освоению новых навыков, создавая условия для комплексной оценки деятельности обучаемых и обучающихся.

УДК 004.3

А.С. Наркевич, ст. преп.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОСНОВЫ UEFI-ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

UEFI (от англ. Unified Extensible Firmware Interface) – унифицированный расширяемый интерфейс прошивки, обновление традиционного BIOS, поддерживающее жёсткие диски объемом более 2Тб, более быструю загрузку, расширенные функции безопасности, а также возможности для настройки графики и курсора мыши. Прошивка BIOS представляет собой набор микропрограмм для работы с аппаратурой компьютера [1].

Термин BIOS может употребляться корректно только по отношению к IBM PC-совместимым компьютерам. Для устройств, построенных на базе других архитектур, используются другие термины. Прошивка BIOS представляет набор микропрограмм, реализующих низкоуровневые API для работы с аппаратным обеспечением компьютера, а также создающих необходимую программную среду для запуска операционной системы для IBM PC-совместимых компьютеров. BIOS относится к системному программному обеспечению.

Основной проблемой традиционного BIOS являются ограничения, которые установлены для его поддержки: 16-разрядный реальный режим работы процессора с набором команд i8086, 1Мб адресуемого пространства памяти и набор периферийных устройств (клавиатура, видео адаптер, контроллер прямого доступа в память) совместимых с IBM AT. С развитием компьютерных систем в коде BIOS продолжали использоваться устаревшие технологии: прежде всего «реальный режим» работы процессора. Для замены устаревшего BIOS была предложена технология EFI.

UEFI – это новый стандарт, который пришёл на смену BIOS и поддерживается Форумом унифицированного расширенного интерфейса прошивки (Unified Extended Firmware Interface Forum).

Основные концепции, положенные в основу технологии UEFI – «минималистичность», «модульность» и поддержка разных процессоров. Прошивка UEFI может быть собрана под 32-битный или 64-битный процессоры Intel, 32- или 64-битный процессор ARM, а также для процессоров Intel Itanium. Кроме того, UEFI имеет собственный менеджер загрузки и работает с файловыми системами на диске (по умолчанию используется FAT32), а также возможно загружать драйверы для поддержки различного периферийного оборудования и любых файловых систем. Менеджер загрузки UEFI используется для выбора и загрузки операционной системы. Загрузчик ОС является приложением UEFI.

После включения компьютера UEFI, как и BIOS, выполняет первичное тестирование оборудования.

UEFI реализует свой менеджер загрузки, он поддерживает мульти-загрузку, позволяя выбирать загрузку из нескольких ОС.

С точки зрения безопасности различия между BIOS и UEFI также являются принципиальными. BIOS не содержит встроенных механизмов защиты процесса загрузки. UEFI включает поддержку механизма Secure Boot. При программировании системной памяти UEFI загрузчика, производители, дополнительно с кодом записывают сертификаты, содержащие ключи. Ключи – это пары ключей (открытый/публичный и закрытый/секретный) сформированные алгоритмом RSA. При загрузке в режиме Secure Boot UEFI проверяет подписи исполняемого кода на соответствие ключам. Если верификация не прошла – такой код не запускается.

В прошивке UEFI встроена командная оболочка (интерфейс), предназначенная для низкоуровневого управления компьютером, диагностики оборудования, обновления BIOS, управления загрузчиками и файловыми операциями до запуска операционной системы. Справочник по командам UEFI shell является встроенным и получить его можно с помощью команды help.

Архитектура и компоненты UEFI представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Архитектура UEFI**

На каждой фазе выполняется своя специфическая задача при старте системы: SEC – фаза безопасности; PEI – предварительная инициализация UEFI; DXE – на этой фазе загружаются и активируются драйверы устройств, создается среда выполнения и система переводится в 64-битный режим работы процессора, готовя её к загрузке ОС; BDS – фаза выбора загрузочного устройства и запуск операционной системы согласно приоритету в NVRAM; Runtime – фаза, на которой происходит загрузка операционной системы [2].

UEFI предоставляет ОС графический интерфейс для выполнения системных функций – настройки времени, управления питанием и других актуальных для пользователей задач.

UEFI позволяет запускать только приложения UEFI, работающие до запуска основной операционной системы. Это программы специального назначения, такие как загрузчики ОС, диагностические утилиты, EFI-оболочки или драйверы, управляющие оборудованием через интерфейс UEFI. Спецификация «UEFI Specification 2.10» доступна по ссылке [3].

Программирование UEFI – это разработка низкоуровневых приложений и драйверов (EFI-приложений), работающих поверх этой прошивки. EFI-приложения – это файлы с расширением .efi, которые выполняются до загрузки ОС. Для написания кода EFI-приложений используются языки ассемблера, C в 32/64-битном режиме работы процессора, возможна поддержка графики и требуемых файловых систем. Основные инструменты разработки: среда EDK II (Intel TianoCore) для сборки, для отладки часто используется эмулятор QEMU/OVMF, который позволяет тестировать код без реальной перезагрузки компьютера.

В листинге 1 представлен код простейшего UEFI-приложения. В Используется GNU-EFI – библиотека и набор инструментов для разработки приложений, работающих непосредственно в среде прошивки UEFI.

```
#include <efi.h>
#include <efilib.h>

EFI_STATUS EFI_API
efi_main(EFI_HANDLE ImageHandle, EFI_SYSTEM_TABLE
*SystemTable)
{
    InitializeLib(ImageHandle, SystemTable);

    Print(L"Hello, UEFI!\n");

    return EFI_SUCCESS;}

```

**Листинг 1 – Код приложения «Hello, UEFI!»**

Код UEFI-программы должен иметь точку входа `efi_main`, получать доступ к системной таблице UEFI, использовать предоставленные прошивкой сервисы для выполнения своих задач.

UEFI-программа представляет собой исполняемый файл формата PE/COFF, который запускается прошивкой UEFI и выполняется в её программной среде. В листинге 2 приведена команда компиляции.

```
gcc -ffreestanding -fshort-wchar -mno-red-zone -fno-stack-protector \  
-I /usr/include/efi \  
-I /usr/include/efi/x86_64 \  
-I /usr/include/efi/protocol \  
-c main.c -o main.o
```

**Листинг 2 – Команда компиляции**

Команда компоновки представлена в листинге 3.

```
ld -shared -Bsymbolic \  
-L/usr/lib \  
-T /usr/lib/elf_x86_64_efi.lds \  
/usr/lib/crt0-efi-x86_64.o main.o \  
-o main.so -lgnuEFI -lefi
```

**Листинг 3 – Команда линковки**

После компоновки необходимо преобразовать elf-файл в файл с расширением `.efi`. В листинге 4 представлена команда, выполняющая это преобразование.

```
objcopy --target=efi-app-x86_64 \  
-j .text -j .sdata -j .data -j .dynamic \  
-j .dysym -j .rel -j .rela -j .reloc \  
main.so BOOTX64.EFI
```

**Листинг 4 – Команда преобразования elf-файла в efi-файл**

Запуск приложения выполняется с помощью эмулятора QEMU. Команда автоматического запуска efi-приложения представлена в листинге 5.

```
qemu-system-x86_64 \  
-bios /usr/share/ovmf/OVMF.fd \  
-drive file=fat:rw:.,format=raw
```

**Листинг 5 – Команда для запуска в QEMU**

В данной работе также реализовано интерактивное efi-приложение, демонстрирующее некоторые возможности среды UEFI: организация точки входа `efi_main`, использование системной таблицы для доступа к сервисам прошивки, взаимодействие с консолью ввода и вывода, а также работа с Boot Services [4].

Особое внимание было уделено механизму вызова функций прошивки через макрос `uefi_call_wrapper`, который обеспечивает кор-

ректное взаимодействие между кодом приложения и интерфейсами UEFI с учётом различий в соглашениях о вызовах.

В рамках примера была реализована простая интерактивная командная оболочка, что позволило наглядно продемонстрировать событийную модель ввода в UEFI.

Кроме того, представлен пример работы с файловой системой через протоколы Loaded Image и Simple File System, что поясняет каким образом UEFI-приложение получает доступ к устройству, с которого оно было загружено, открывает файловую систему, работает с файлами, управляет памятью и выводит данные пользователю – всё это до загрузки операционной системы [5].

Данный пример показывает, что при использовании библиотек, таких как GNU-EFI, программирование под UEFI становится достаточно понятным и доступным даже для начинающих разработчиков.

Целью работы является демонстрация использования программной среды UEFI, в которой возможно создание интерактивных приложений, работающих с входными данными пользователя, сервисами прошивки, ещё до запуска операционной системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1 Что такое UEFI, и чем он отличается от BIOS? [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/404511>– Дата доступа: 04.02.2026

2 Внутренняя кухня UEFI: что это такое и как мы готовим его в YADRO [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/companies/yadro/articles/886480/> – Дата доступа: 04.02.2026

3 UEFI Specification 2.10 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://uefi.org/specs/UEFI/2.10/> – Дата доступа: 04.02.2026

4 Разработка ОС [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mayerdev.github.io/osdev/intro/> – Дата доступа: 04.02.2026

5 Путешествие сквозь секреты прошивок: от BIOS/UEFI до OS [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/835844/>– Дата доступа: 04.02.2026

## **РАЗВИТИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ГЕНЕРАТИВНОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЕКТА И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ**

Ключевая задача программной инженерии всегда состояла в преобразовании системных требований, эффективные и надёжные алгоритмы, воплощённые в коде. Однако с появлением генеративного искусственного интеллекта (ГИИ), способного синтезировать программный код по естественно-языковым описаниям, сами основы этого процесса подвергаются пересмотру.

Технологии вроде GitHub Copilot, основанные на крупных языковых моделях (Large Language Models, LLM), эволюционируют от инструментов автодополнения к концепции активных участников разработки, способных выполнять многошаговые задачи [1]. Этот сдвиг знаменует собой фундаментальное изменение подходов, когда акцент деятельности постепенно перемещается от написания алгоритмов к их точной спецификации и внедрения в более крупные системы [2]. Согласно прогнозам, на 2026 год, развитие будет определяться не отдельными моделями, а целыми системами и агентами, способными к автономному планированию и выполнению рабочих процессов [3]. Данная трансформация ставит перед дисциплиной программной инженерии ряд новых вопросов, касающихся изменения ролевой модели разработчика, переопределения жизненного цикла ПО и возникновения уникальных рисков. В этой статье анализируется влияние ГИИ на эволюцию алгоритмических подходов и рассматриваются ключевые последствия для методологий, практик и образования в области программной инженерии.

### **Эволюция роли разработчика**

Внедрение генеративного ИИ в жизненный цикл разработки ПО приводит к глубокому перераспределению профессиональных задач и необходимых компетенций. Если в 2022-2024 годах доминировали инструменты уровня «умного автодополнения» (поколение 1, например, GitHub Copilot), то трендом 2026 года становятся автономные агенты (поколение 3), которые могут самостоятельно брать задачу, писать код, запускать тесты и создавать запросы на объединение [1]. Эта динамика наглядно показывает постепенное смещение роли человека с тактического написания строк кода на деятельность стратегического характера. Как отмечают эксперты, разработчик превращается в

рецензента и создателя, в то время как механическую работу выполняют ИИ-агенты [4].

В новом подходе от инженера требуются принципиально иные ключевые компетенции. Прежде всего, это способность к алгоритмизации на высоком уровне абстракции, что означает умение декомпозировать сложную бизнес-проблему не на функции и классы, а на чёткие, контекстуально полные спецификации для ИИ-агента. Разработчик теперь формулирует не то, как решить задачу, а что должно быть решено и в каких граничных условиях. Не менее важным становится управление контекстом, поскольку эффективное взаимодействие с ИИ превращается в новый вид интерфейса между замыслом и его реализацией. Эксперты подчёркивают, что в 2026 году успех будет зависеть от способности управлять контекстом проекта и точно доносить задачи до модели [5]. Одновременно резко возрастает значимость критического мышления и верификации. Поскольку ИИ может генерировать правдоподобный, но содержащий ошибки, неоптимальный или даже небезопасный код, фундаментальной обязанностью разработчика становится тщательная проверка, тестирование и анализ предлагаемых решений [6]. Наконец, в условиях использования многоагентных систем, где различные ИИ-агенты специализируются на отдельных задачах, роль инженера трансформируется в роль руководителя, который проектирует взаимодействия и рабочие процессы между этими автономными компонентами. Этот подход, становится ключевым навыком, смещая разработчика от написания кода к управлению командами агентов [7].

Таким образом, алгоритмическое мышление не утрачивает актуальности, а поднимается на мета-уровень, фокусируясь на проектировании систем и процессов в целом, что созвучно общим трендам трансформации инженерного труда под влиянием ИИ [8].

### **Изменение алгоритмических подходов и возникновение новых классов задач**

Проникновение ГИИ в программную инженерию порождает новые области для применения и развития алгоритмических подходов, выходящие далеко за рамки традиционного кодирования. Одной из таких областей стала алгоритмизация взаимодействия в многоагентных средах. Проектирование устойчивых и эффективных протоколов для ИИ-агентов превращается в сложную алгоритмическую задачу, требующую решения проблем распределения задач, избежания конфликтов, обеспечения консистентности данных и достижения глобальных целей. Для поддержки таких систем возникают новые стандарты, такие как Model Context Protocol (MCP), который становится ключевым для подключения агентов к инструментам и данным [3].

Этот сдвиг указывает на переход от конкурентной борьбы на уровне моделей ИИ к конкуренции на уровне целых систем и платформ [7].

Другим вызовом является то, что генеративный ИИ, часто оптимизированный для быстрого достижения локальных целей, может способствовать накоплению специфического «агентного техдолга», выражающегося в создании избыточно сложного, плохо структурированного или содержащего скрытые уязвимости кода. Исследования указывают на рост метрик, подобных Code Churn (текучесть кода), когда разработчики, увлечённые лёгкостью генерации, многократно переписывают одни и те же участки, не добавляя ценности, а также на риск «разработки через копипаст» (Copy-Paste Driven Development) [9]. Противодействие этому требует разработки новых алгоритмов статического и динамического анализа, способных выявлять паттерны, характерные для ИИ-генерируемого кода, а также алгоритмов автоматической переработки.

Параллельно наблюдается развитие формальных методов спецификации, поскольку растёт потребность в языках и методах, которые могли бы однозначно описывать требования для ИИ-агентов, минимизируя неопределённость и риск ошибок. Передовые практики смещаются от «вейб-кодинга» к «Протоколу Цель-Валидация» (Objective-Validation Protocol), где пользователь определяет цели и проверяет результаты, а агенты автономно исполняют задачи [5]. Это стимулирует интерес к интеграции методов контрактного программирования и формальной верификации в процесс промпт-инжиниринга (взаимодействия с ИИ). Всё чаще успешная работа с ИИ начинается с создания детального плана и спецификации, что позволяет и разработчику, и агенту находиться «на одной странице» [6].

### **Последствия для образования и промышленных практик**

Трансформация алгоритмических подходов под влиянием генеративного ИИ требует адекватного и сбалансированного ответа как от системы образования, так и от промышленных стандартов. В образовательных программах акцент должен постепенно смещаться с механического запоминания синтаксиса конкретных языков к углублённому пониманию фундаментальных принципов. Структуры данных, алгоритмическая сложность, архитектурные паттерны и методологии проектирования становятся важнее, чем когда-либо, поскольку только прочное усвоение этих основ позволяет будущим специалистам эффективно направлять и критически оценивать работу ГИИ [2]. Параллельно с этим возникает необходимость в интеграции новых дисциплин, связанных с основами работы LLM, промпт-инжинирингом, инженерией контекста и этическими аспектами применения подобных систем в профессиональной деятельности.

На уровне промышленных методологий также необходима адаптация. Стандартные процессы разработки, такие как Agile и DevOps, должны быть пересмотрены с учётом включения ИИ-агентов в качестве полноправных участников рабочих процессов. Это касается всех этапов. На этапе планирования задач требуется новая чёткость формулировок. При проведении анализа проверяется не только итоговый код, но и исходные промпты с контекстом, а также соответствие результатов архитектурным решениям. Процедуры тестирования и непрерывной интеграции должны быть усилены для автоматизированной проверки ИИ-генерируемого кода [1]. Особую важность приобретает управление знаниями и контекстом организации, что напрямую влияет на эффективность работы интеллектуальных агентов [5].

Кроме того, широкое внедрение ГИИ выводит на первый план комплекс этических, управленческих и экономических вопросов. Речь идёт об определении авторства кода, распределении ответственности за возможные ошибки, обеспечении безопасности данных (например, через использование локальных моделей или Enterprise Trust Layer [10]) и трансформации профессиональных ролей на рынке труда. Индустрия переходит от фазы экспериментов к фазе измерения реальной отдачи от инвестиций и экономической эффективности [8]. Таким образом, перед программной инженерией стоит задача разработки концепций и лучших практик для безопасного, этичного и одновременно эффективного использования генеративных технологий, что требует междисциплинарного подхода и стратегического управления изменениями.

Таким образом развитие алгоритмических подходов под влиянием генеративного искусственного интеллекта представляет собой не кризис дисциплины, а её закономерную и глубокую эволюцию. Фундаментальное алгоритмическое и системное мышление не только не теряет своей актуальности, но и становится важнейшим дифференцирующим навыком современного инженера. Однако область его применения закономерно смещается с уровня непосредственной реализации на уровень проектирования, создания спецификаций и осуществления контроля. Актуальными проблемами программной инженерии сегодня становятся разработка методологий эффективного симбиоза человека и ИИ, создание инструментов для управления качеством и безопасностью ИИ-генерируемых продуктов, а также адаптация образовательных стандартов и промышленных практик к новым подходам. Успешное будущее профессии напрямую связано со способностью инженеров выступать в роли создателей интеллектуальных систем, где глубокое понимание классических принципов алгоритмизации служит надёжной основой для управления мощностью генеративного

искусственного интеллекта и направления её на решение сложных практических задач. Как отмечают аналитики, в 2026 году фокус смещается с самих моделей на системы и результаты их работы [3], и именно программные инженеры, обладающие соответствующими мета-навыками, будут определять, какие результаты будут достигнуты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акерман Д. Code AI 2026: Почему 'просто Copilot' уже недостаточно и как нейросети переписывают профессию программиста // Mypl.pro. – 2025. – 2 декабря. – URL: <https://mypl.pro/blog/code-ai-2026-why-just-copilot-is-no-longer-enough-and-how-neural-networks-rewrite-the-profession-of-a-programmer> (дата обращения: 13.01.2026).

2. Топ-10 AI-помощников для программирования: обзор инструментов и как с ними работать // GoIT. – 2026. – URL: <https://goit.global/ua-ru/articles/ai-dlia-programmirovaniya/> (дата обращения: 13.01.2026).

3. The trends that will shape AI and tech in 2026 // IBM Think. – 2026. – 1 января. – URL: <https://www.ibm.com/think/news/ai-tech-trends-predictions-2026> (дата обращения: 13.01.2026).

4. Число пользователей GitHub Copilot превысило 20 миллионов // Habr. – 2025. – URL: <https://habr.com/ru/companies/bothub/news/932668/> (дата обращения: 13.01.2026).

5. Osmani A. My LLM coding workflow going into 2026 // Medium. – 2026. – URL: <https://medium.com/@addyosmani/my-llm-coding-workflow-going-into-2026-52fe1681325e> (дата обращения: 13.01.2026).

6. Large Language Models: What You Need to Know in 2026 // Hatchworks. – 2025. – 23 декабря. – URL: <https://hatchworks.com/blog/gen-ai/large-language-models-guide/> (дата обращения: 13.01.2026).

7. Signals for 2026 // O'Reilly Radar. – 2026. – URL: <https://www.oreilly.com/radar/signals-for-2026/> (дата обращения: 13.01.2026).

8. Топ-7 трендов ИИ, за которыми стоит следить в 2026 году // CometAPI. – 2026. – 8 января. – URL: <https://www.cometapi.com/ru/top-7-ai-trends-to-watch-in-2026/> (дата обращения: 13.01.2026).

9. Top 9 Large Language Models as of January 2026 // Shakudo. – 2026. – URL: <https://www.shakudo.io/blog/top-9-large-language-models> (дата обращения: 13.01.2026).

10. 30 of the best large language models in 2026 // TechTarget. – 2025. – 3 декабря. – URL: <https://www.techtarget.com/whatis/feature/12-of-the-best-large-language-models> (дата обращения: 13.01.2026).УДК

## **АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕГРУЗКАМИ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

### **Введение**

Для оценки производительности современных телекоммуникационных систем используются различные методы, которые позволяют систематизировать исходные статистические данные для последующих теоретических и практических исследований. С их помощью проводится анализ системы на предмет ее работоспособности, выполняется оценка объема выборки, необходимой для получения результатов, требуемой точности. При их использовании составляются вероятностные модели функционирования телекоммуникационной сети и выполняется анализ вводимых переменных. Переменные изменяются в рамках предлагаемых условий и прогнозируется поведение системы в изменяющихся условиях эксплуатации.

Однако есть и другие методы прогнозирования поведения телекоммуникационных систем, например, в условиях перегрузки. Эти методы основаны на анализе работы действующих в телекоммуникационных сетях протоколов. В основном рассматриваются протоколы транспортного уровня. В этом смысле протокол ТСР является одним из основных, поскольку имеет ряд преимуществ, например, работает с предварительным установлением соединения, предполагает повторные запросы и т.д. Но, кроме этих свойств, ТСР является лучшим индикатором неявной сетевой перегрузки. Потеря пакетов происходит и по причине, например, снижения надежности канала связи, что, в свою очередь, отражается на скорости передачи и, как следствие, приводит к снижению производительности. Эта проблема особенно актуальна для подверженных ошибкам беспроводных линий. ТСР использует два разных механизма для обнаружения потери пакетов. Первый метод использует таймер повторной передачи. Второй метод известен как быстрая ретрансляция.

Он направлен на усиление чувствительности системы к потерям пакетов. Считается, что канал перегружен в случае, если:

- 1) АСК не получен в течение предопределенного времени – тайм аут;
- 2) получен тройной дубликат АСК (4 АСК с одинаковым порядковым номером).

### **Алгоритмы управления перегрузками**

Алгоритм медленного старта

Алгоритм медленного старта необходим для определения пропускной способности канала. В его реализации участвуют два компонента:

1) скользящее окно (Sliding Window, SW), управляемое получателем путем сообщения отправителю максимального числа принимаемых пакетов (Receiver's Advertised Window, rwnd);

2) окно перегрузки (Congestion Window, CWND), управляемое отправителем и реагирующее на проблемы в сети (рис. 1).

Начинает работу алгоритм с отправки одного пакета, затем, для каждого полученного подтверждения (ACK), окно перегрузки (CWND) увеличивается на единицу, то есть фактически оно удваивается за время, равное RTT (round-trip time). Процесс передачи данных проиллюстрирован на рисунке 1.

В процессе передачи данных наблюдается экспоненциальный рост CWND. Окно достигает максимума  $CWND = RTT * \log_2(\text{MaxWin})$  [1].

### Алгоритм предотвращения перегрузок

Предотвращение перегрузок (Congestion Avoidance) реализуется при помощи Slow-Start (рисунок 2).

Алгоритм реализации:

if (cwnd <= ssthresh)

cwnd += 1;

else

cwnd += 1/cwnd;

В случае тайм-аута

ssthresh = min(cwnd, rwnd) / 2; cwnd = 1.

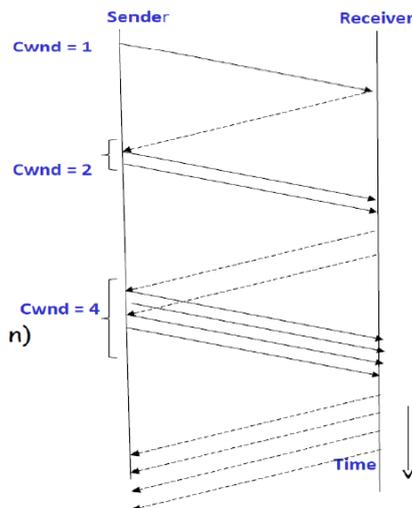


Рисунок 1 – Процесс передачи данных (Slow Start)

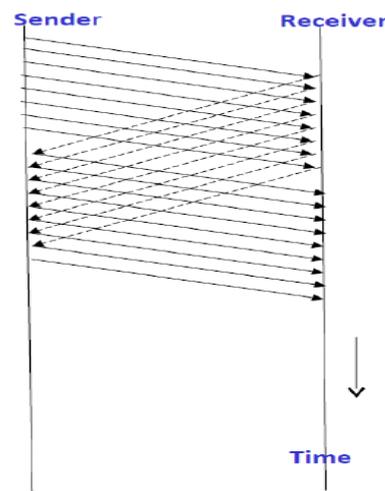


Рисунок 2 – Предотвращение перегрузок Slow-Start

Реализация приведенного алгоритма проиллюстрирована на рисунке 3.



Рисунок 3 – Реализация алгоритма CA

Экспоненциальный рост продолжается до значения  $ssthreshold$  (Slow Start Threshold), которое указывается в конфигурации TCP на хосте. Далее начинается линейный рост по  $1/CWND$  на каждый подтвержденный сегмент до тех пор, пока не достигнет  $RWND$ , либо придет тайм-аут, что означает ACK не получен в течение предопределенного времени.

Как только зафиксирован тайм-аут, передача снова начинается по алгоритму медленного старта, а значение  $ssthreshold$  уменьшается вдвое от размера  $CWND$ . Далее, алгоритм медленного старта будет выполняться вновь до значения  $ssthreshold$ .

### Заключение

В статье рассматриваются механизмы определения пропускной способности каналов, ограничения длительных интервалов ожидания с целью предотвращения перегрузок и получения оценки производительности телекоммуникационных систем. Алгоритмы быстрая ретрансляции и быстрого восстановления направлены на адаптацию скорости отправки на основе наблюдаемой перегрузки, таким образом и происходит предотвращение перегрузки в сети.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kurose J., Ross K.W. Computer Networking: A Top Down Approach, Pearson, 7th edition, 2017. 864p. (in English)
2. Varma S. Internet Congestion Control, Kaufmann, 2015. 286p. (in English)
3. Peterson L., Davie B.S. Computer Networks, Elsevier, 5th edition, 2012. 813p. (in English)
4. RFC 793. Transmission Control Protocol, RFC 793, September, 1981.

## 8.3 Подсекция "ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА В ДИЗАЙНЕ, КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА"

УДК 681.3+004.42+537.6

О.А. Новосельская, доц.; Н.А. Савчук, ст. преп.  
(БГТУ, г. Минск, РБ)

### ЦВЕТОВЫЕ ПРОФИЛИ. ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАНЫХ

Цветовой профиль – это набор данных, в котором описана информация об охвате цветов при их вводе или выводе на различных устройствах вроде смартфонов, принтеров, сканеров и так далее. Стандарты для этого процесса определил Международный консорциум по цвету (International Color Consortium), поэтому его также называют ICC-профилем [1]. Профили ICC используются для преобразования цвета персональным компьютером на пути от устройства к устройству, например, «графический файл – изображение на мониторе» или «графический файл – распечатанное принтером изображение». Основная цель их использования – получение цвета максимально близкого к натуральному, вопреки дефектам носителей, вроде низкой контрастности экрана или низкого качества чернил.

На рис. 1 показана схема управления цветом для различных устройств на платформе Windows с помощью модуля Microsoft ICM.

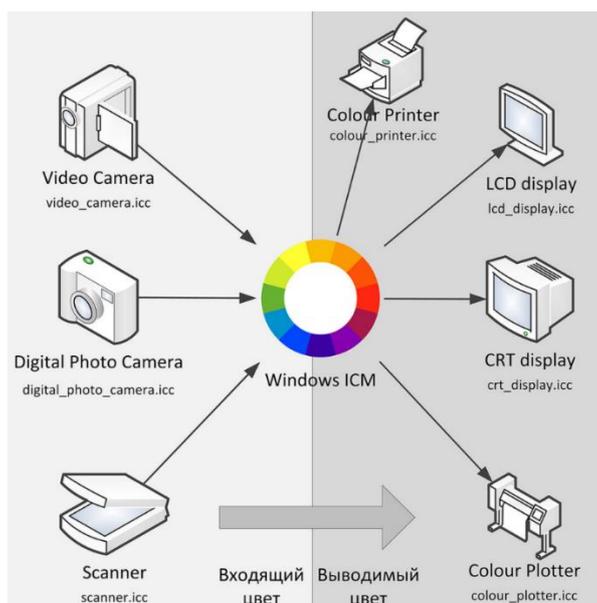


Рисунок 1 – Схема управления цветом в Windows

На рис. 1 следует выделить три основных профиля: это входной профиль для устройства типа сканер, камера и т.п.; профиль, который воспроизводит информацию на монитор; профиль выходного устройства, такого как печатная машина или принтер. Различные типы устройств имеют разные цветовые характеристики и возможности.

Например, дисплеи не могут отображать тот же набор цветов, который способен воспроизвести принтер. Это обусловлено тем, что в каждом устройстве при воспроизведении цвета применяется свой процесс, отличный от процесса другого устройства. Сканеры и цифровые фото- и видеокамеры также обладают различными цветовыми характеристиками и профилями. Даже разные программы по-разному интерпретируют и обрабатывают цвета. При отсутствии согласованной системы управления цветом на каждом из этих устройств одно и то же изображение может выглядеть совершенно по-разному. Поэтому система управления цветом позволяет преобразовать цвета из параметров, прописанных в профиле одного устройства, в параметры другого устройства.

Например, пусть есть изображение в виде фотографии, полученной с фотокамеры. В комплекте с каждым устройством, воспроизводящим или считывающим графическое изображение, поставляется *icc*-файл, содержащий цветовой профиль. Монитор, который отображает цвета, имеет собственные настройки красного, зеленого и синего излучений. При отображении фотографии базовые цветности красного, зеленого и синего будут изменены согласно профилю монитора. Поэтому на разных мониторах одно и то же изображение будет отображаться по-разному. Если данную фотографию необходимо напечатать на конкретном принтере, то система управления цветом считывает профиль фотографии (в частности, конкретный профиль цветового пространства RGB – чаще всего это *sRGB* или *Adobe RGB*). Далее из предустановок драйвера принтера считывается конкретный профиль принтера, в котором содержится информация о цветностях красок *СМУК* и белой точки. Для преобразования из RGB в *СМУК* в промежуточное цветовое пространство *PCS* (*Profile Connection Space*). В любом профиле с помощью утилит считывания можно проверить какое конкретно промежуточное цветовое пространство используется. На рис. 2 показаны два профиля – для монитора (сверху) и для принтера (снизу).

Из рис. 2 видно, что в качестве промежуточного цветового пространства могут выступать различные цветовые пространства. Система управления цветом на уровне ОС позволяет пересчитывать координаты по известным преобразованиям. Для связи наиболее часто ис-

пользуется преобразованием из CIE XYZ в CIE L\*a\*b\*. В профилях под пространством Lab часто понимается как раз уточненное стандартизированное пространство CIE L\*a\*b\*.

Browse... C:\Windows\System32\spool\drivers\color\LG HDR 4K\_15-06-2024.icm

Header Info:

Size: 28020 bytes  
 CMM Type:  
 Version: 0x2100000  
 Device Class: display  
 Color Space: RGB  
 PCS: XYZ  
 Date: 2024/6/15, 8:22:24  
 Magic: acsp  
 Platform: MSFT  
 Flags: not embedded, independently  
 Manufacture:  
 Model: 0x0  
 Attribute: reflective, glossy, positive, color  
 Intent: Perceptual  
 Illuminant: X=0.96420, Y=1.00000, Z=0.82491  
 Creator: XRCM  
 Profile ID: 00000000-00000000-00000000-00000000

Tag Table (15 tags):

#	Signature	Offset	Size
0	desc	312	165
1	chad	480	44
2	cpri	524	31
3	wtpi	556	20
4	lumi	576	20
5	rXYZ	596	20
6	gXYZ	616	20
7	bXYZ	636	20
8	rTRC	656	524
9	gTRC	1180	524
10	bTRC	1704	524
11	vcgt	2228	1583
12	CxF	3812	24009
13	DDPS	27824	9
14	meta	27836	184

Browse... C:\Windows\System32\spool\drivers\color\EPSON L805 Series Standard.icc

Header Info:

Size: 72068 bytes  
 CMM Type: appl  
 Version: 0x2400000  
 Device Class: output  
 Color Space: RGB  
 PCS: Lab  
 Date: 2007/1/15, 17:25:1  
 Magic: acsp  
 Platform: APPL  
 Flags: not embedded, independently  
 Manufacture: EPSO  
 Model: 0x45373633/E763  
 Attribute: reflective, glossy, positive, color  
 Intent: Perceptual  
 Illuminant: X=0.96420, Y=1.00000, Z=0.82491  
 Creator:  
 Profile ID: 00000000-00000000-00000000-00000000

Tag Table (15 tags):

#	Signature	Offset	Size
0	cpri	312	44
1	wtpi	356	20
2	bkpt	376	20
3	B2A0	396	32602
4	B2A1	396	32602
5	B2A2	396	32602
6	A2B0	33000	32602
7	A2B1	33000	32602
8	A2B2	33000	32602
9	gamt	65604	5985
10	LUTI	71592	10
11	dmnd	71604	110
12	dmdd	71716	128
13	desc	71844	173
14	drvn	72020	46

**Рисунок 2 – Сравнение PCS для различных устройств**

Рис. 2 также показывает структуру любого профиля. В левой части окна просмотрщика профиля содержится заголовок. Заголовок является стандартизированной частью профиля и содержит фиксированное число элементов. Рядом с заголовком располагается таблица тегов. В отличие от заголовка, таблица тегов может различаться в зависимости от типа устройств. Более того, сами теги также делятся на категории обязательных тегов ICC, не обязательных и пользовательских. Как правило, наибольший интерес представляют теги LUT (Look

Up Tables), которые являются основными для управления цветом, поскольку именно через них осуществляется преобразование из PCS в рабочее пространство устройства (Color Space). Выходные профили должны содержать шесть LUT для различных целей визуализации. Это перцептивная (A2B0 / B2A0), относительная колориметрическая (A2B1 / B2A1) и насыщенности (A2B2 / B2A2). Абсолютная колориметрическая не хранится в профиле, а создается в процессе выполнения преобразования. При этом AToVx отвечает за преобразование, осуществляемое из координат устройства в PCS, а BToAx – из пространства PCS в координаты устройства. Разрешение матрицы LUT определяется количеством узлов и влияет на качество преобразования. Чем больше узлов, тем выше детализация бликов и теней, лучше цветопередача. Детализация данных в профиле принтера Epson L805 Series для стандартной бумаги показала, что он использует 17 узлов как для прямого, так и для обратного преобразования, что является средним результатом. В то же время для более качественной бумаги типа Premium Glossy количество узлов уже составляет 33. Т.е. для повышенного качества печати требования к цветопередаче возрастают. Помимо тегов LUT профиль также определяет координаты первичных цветов, кривой воспроизведения тона, белой точки, хроматической адаптации, гаммы цвета и др.

В настоящее время архитектура профиля ICC может быть построена по принципу ICC.1 либо iccMAX. ICC.1 определяет профили версий v2 и v4, которые являются наиболее распространенными. Однако в архитектуре нового поколения (ICC.2 = iccMAX) предложено ряд усовершенствований. В частности, PCS от колориметрического может быть расширено до спектрального, учитывающего такие факторы как отражение, пропускание, эмиссию и биспектральность (люминесцентность) излучений. Также она направлена на поддержку XML представление профиля, что в будущем позволит внедрять оттенки цвета, спектральные соединения для источника света, биомаркеры для визуализации в медицине и т.п.

Таким образом, понимание профиля и управление цветом через него предоставляет широкие возможности для корректировки параметров вывода и уточнения визуального представления цвета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ISO 20677:2019 Image technology colour management – Extensions to architecture, profile format and data structure (ISO, Geneva).

## SEO В 2025 ГОДУ И ПРОГНОЗЫ НА 2026 ГОД

Цель проведенных исследований – подвести итоги в области поисковой оптимизации и продвижения сайтов за 2025 год, а также обобщить наметившиеся тренды SEO в 2026 году.

В 2025 году традиционные алгоритмы уступили место искусственному интеллекту, предоставляющему пользователям готовые решения, а не набор гиперссылок. В частности, в ноябре корпорация Google интегрировала новую систему – Gemini 3, основанную на продвинутих технологиях ИИ. Это обновление позволило выводить развернутые аналитические отчеты, содержащие объяснения, иллюстрации, схемы и интерактивные элементы, делая процесс поиска еще удобнее и нагляднее.

Тем временем Яндекс совершил прорыв в области интеллектуального поиска. Осенью была представлена новая версия сервиса, работающая на платформе Алиса AI. Обновленный алгоритм самостоятельно объединяет информацию из различных ресурсов и формирует целостное представление по запросу пользователя, которое включает полный обзор темы, рекомендации и полезные советы. Более того, Алиса выступает настоящим помощником, способным подбирать варианты товаров, заказывать билеты и взаимодействовать с экосистемой сервисов Яндекса.

SEO-маркетинг меняет правила игры: ранее успех сайта зависел исключительно от высоких позиций в результатах выдачи, ведь первые места привлекали максимум трафика и конверсий.

Однако в условиях современных реалий такая прямая связь между позициями и доходностью стала менее очевидна.

Сегодня пользователи часто получают исчерпывающий ответ непосредственно в поисковике, минуя необходимость перехода на сторонний ресурс. Согласно исследованию Digital Marketing Consultant Vlada Kuryatnih («Обзор наиболее цитируемых доменов в Google AI»), эффективность SEO теперь измеряется иначе [1].

Для достижения успеха недостаточно занимать верхние строчки рейтинга. Гораздо важнее присутствовать в рекомендованных блоках нейроответов, поскольку именно они формируют восприятие пользователя и влияют на принятие решений независимо от факта посещения страницы.

Контент нового формата – прошли времена простого наполнения страниц ключевыми словами и LSI-тегами. Эффективный контент 2025 года строится на четкой структуре, информативности и подкреплён проверенных фактов. Чтобы попасть в выдачу нейроответов, тексты должны отвечать следующим критериям:

- ясность изложения и лаконичность формулировок;
- логичная структура с использованием заголовков, списков и таблиц;
- экспертность авторов и репутация ресурса;•
- актуальность представленной информации и наличие заслуживающих доверия источников.

Эти изменения ставят новые требования перед создателями контента, заставляя адаптироваться к потребностям умных алгоритмов, одновременно оставаясь полезными и удобными для конечных пользователей.

На основе анализа многочисленных источников информации, на наш взгляд, можно выделить основные направления развития SEO в 2026 году.

Современный рынок демонстрирует переход классических механизмов поиска в новое качество: традиционные поисковые интерфейсы преобразуются в динамичные диалоговые платформы, генерируя готовую информацию (генеративные обзоры, чат-боты). Важнейшие характеристики грядущего года включают следующие аспекты:

Интеграция рекомендаций ИИ-систем значительно снижает количество переходов на внешние ресурсы (явление Zero-click), постепенно меняя привычную схему распределения трафика.

Оптимизация под генерацию контента (Generative Engine Optimization) – потребуются тщательная адаптация сайтов и материалов под запросы искусственного интеллекта, включая четкую структуру, сжатость и точность подачи материала.

Попадание в индекс нейронных сетей – наличие своего контента среди рекомендуемых системой источников повышает шансы оказаться на вершине результатов поиска.

Возрастание роли брендовых факторов и экспертизы. Искусственный интеллект учитывает репутацию брендов и уровень авторитета ресурса, формируя свое мнение относительно релевантности материала. Ключевыми аспектами становятся:

Высокое качество предоставляемого контента и подтверждение авторства, исключающее возможность попадания некачественных статей в выдачу.

Наблюдается повышение значимости качественного контента и персонализации взаимодействия. Новые требования к контенту предполагают следующее.

Контент должен нести максимальную полезность для читателя, выраженную в уникальных исследованиях, реальных примерах и личном опыте экспертов и т.д.

Четкое оформление структуры текста, облегчающей обработку языковой моделью (LLM).

Использование мультимедийных форматов, таких как видеоролики, инфографика и тематические исследования.

Несмотря на важность показателей поведения пользователей, злоупотребления инструментами воздействия на поведение начинают жестко пресекаться. Платформы ужесточают контроль над действиями ботов и массовыми кампаниями, снижающими качество поиска.

Оптимизаторы сталкиваются с новой задачей: привлечение клиентов не только традиционными способами (через поисковые системы), но и расширением присутствия на платформах вроде маркетплейсов, социальных сетей и видеохостингов. Это создает предпосылки для появления концепции «повсеместного поиска» (Search Everywhere Optimization), предполагающей комплексное взаимодействие с разными площадками.

Ссылочный профиль сохраняет свою значимость в рамках SEO-стратегии. Качественное создание собственных сеток сайта (PBN) становится необходимым условием конкурентоспособности.

Простое приобретение дешевых ссылок утрачивает смысл, провоцируя негативные последствия вплоть до санкций поисковых систем.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Успех SEO зависит от глубокой интеграции продукта, внимания к качеству и соответствию ожиданиям современного потребителя.

Генеративные технологии требуют изменений подходов к созданию контента и распределению бюджета.

Оптимизированные под современные условия кампании станут основой устойчивого роста бизнеса в будущем.

Необходимость комплексного продвижения бренда, построения положительного имиджа и высокого уровня узнаваемости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор наиболее цитируемых доменов в Google AI: анализ влияния на трафик в 2025 году. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://thedigitalbloom.com/learn/google-ai-overviews-top-cited-domains-2025> – Дата доступа 10.01.2026.

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДВИЖЕНИЯ НОВОГО ТОВАРА НА РЫНОК**

Основной целью проведенных исследований являлось создание виртуальной модели потребительского рынка для прогнозирования продаж и тестирования маркетинговых стратегий.

Под имитационным моделированием будем понимать компьютерное воспроизведение набора правил, согласно которым исследуемая система переходит из одного состояния в другое. К основным методам имитационного моделирования относят [1]:

- дискретно-событийное (процессное) моделирование;
- агентное моделирование;
- системная динамика.

Для реализации поставленной цели, был выбран метод агентного моделирования. Под агентом будем понимать некую сущность, которая функционирует в исследуемой системе и может взаимодействовать (или не взаимодействовать) с другими сущностями этой системы. Инструментом реализации – AnyLogic – программное обеспечение для имитационного моделирования (<http://www.anylogic.com>).

Для достижения поставленной цели, с помощью AnyLogic были решены следующие задачи:

- создана популяция агентов, имитирующая потребительский рынок;
- задано поведение потребителей;
- настроены необходимые параметры;
- проведена апробация модели.

Суть модели заключалась в следующем. Имеется новый товар, который необходимо продвинуть в некотором регионе (потребительский рынок), который представлен популяцией агентов – потенциальных покупателей продвигаемого товара.

Для продвижения товара используется реклама, а также так же учтена возможность продвижения за счет общения агентов между собой. При этом можно менять параметры среднего числа контактов за день и срока годности продукта (срока его эксплуатации).

Исследования проводились в несколько этапов.

Этап 1. Задание агентов (потребителей) и их состояний:

С помощью мастера агентов был создан новый тип агента и затем создана популяция из 6 000 агентов.

После этого задавались состояния агентов:

– PotentialUser – находящийся в данном состоянии агент является потенциальным покупателем и может быть заинтересован в покупке;

– WantToBuy – потребители в этом состоянии решили купить продукт, но продукт пока еще не приобрели;

– User – потребитель, находящийся в этом состоянии, уже купил продукт.

Этап 2. Разработка диаграммы состояний и указание параметров.

Диаграммы состояний (карты состояний, стейтчарты) являются самым удобным средством задания поведения агента [1]. Диаграммы состояний содержат состояния и переходы. Состояния диаграммы являются взаимоисключающими, то есть в каждый момент времени агент может находиться только в одном состоянии. Срабатывание перехода приводит к смене состояния и активации новых переходов. Допускается создание иерархических состояний, которые содержат внутри себя другие состояния и переходы.

У одного агента может быть сразу несколько диаграмм состояний, каждая из которых описывает независимые аспекты поведения агента (рис. 1).

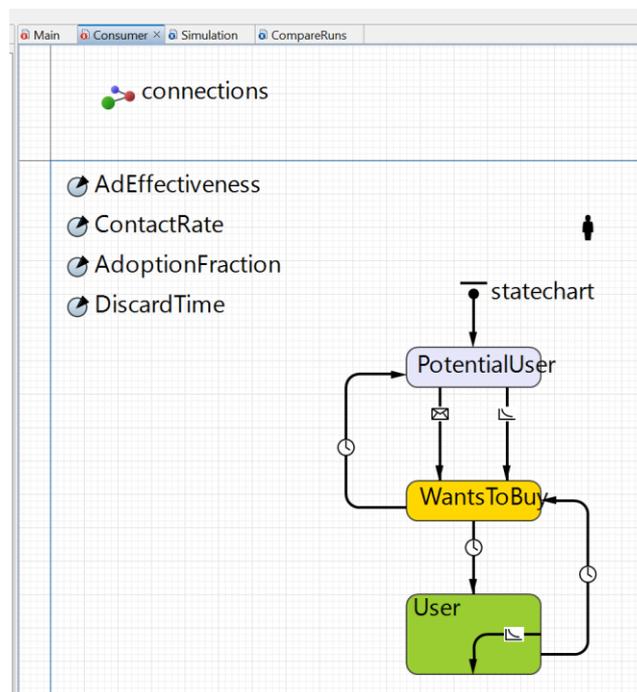


Рисунок 1 – Диаграмма состояний

*AdEffectiveness (AE)* – процентная доля потенциальных потребителей, которые захотят купить продукт в течение дня вследствие воздействия рекламы.

*AdoptionFraction (AF)* – вероятность приобретения продукта потенциальным потребителем под воздействием общения.

*ContactRate (CR)* – среднее количество контактов потребителя с другими людьми в течение дня.

*DiscradTime (DT)* – срок годности продукта.

### Этап 3. Апробация модели.

Для визуализации процесса моделирования, в модель были внедрены графики, отражающие состояние агентов (рис. 2).

Таким образом, разработанная модель позволяет:

- изучать динамику доли потенциальных покупателей, которые приобретут товар под влиянием рекламы;
- изучать динамику доли потенциальных покупателей, которые приобретут товар под влиянием рекомендаций других покупателей;
- добавлять новые каналы продвижения товара и изучать их влияние.

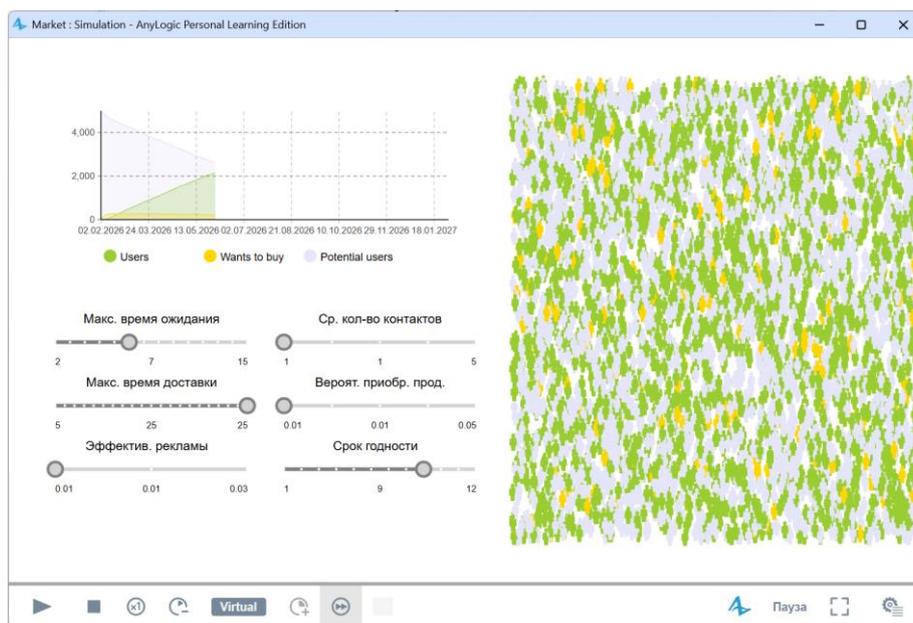


Рисунок 2 – Апробация модели потребительского рынка

Помимо этого, важно отметить, что в модель легко адаптируется под любую продуктовую нишу и позволяет моделировать насыщение рынка продвигаемым товаром с учетом различных критериев.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев И. AnyLogic за три дня; 2024. – 228 с.

## ОСОБЕННОСТИ КАСТОМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ HTML-ФОРМ СРЕДСТВАМИ CSS

Веб-формы долгое время были проблемой для фронтенд-разработчиков, стремящихся создать эстетические и функциональные интерфейсы. Нативные элементы, такие как чекбоксы и выпадающие списки, сложно кастомизировались с помощью CSS, что требовало применения JavaScript или замены семантических HTML-элементов на несемантические. Современный CSS, однако, предоставил мощные инструменты для стилизации форм, не жертвуя доступностью и производительностью.

Цель данного исследования заключается в анализе возможностей современных инструментов CSS для разработки сложных, эстетически привлекательных и интерактивных элементов форм, которые ранее не могли быть реализованы без обязательного применения JavaScript.

Суть современной кастомизации форм на CSS заключается в эффективном использовании семантической HTML-разметки, псевдоклассов (:checked, :focus, :hover и др.) [1] и псевдоэлементов (::before, ::after) [2] для создания нового визуального слоя, а также продвинутых CSS-свойств (appearance, clip-path, transition и transform). Основной принцип состоит в обоснованном скрывании нативных элементов и их визуальной «подмене», что сохраняет функциональность и доступность для ассистивных технологий. Данный подход принципиально отличается от устаревших методов.

Можно выделить следующие способы и техники использования CSS для стилизации элементов форм:

- использование тегов <input> и <label> с соседними селекторами;
- сокрытие исходного элемента с сохранением функциональности при помощи свойств opacity и position;
- использование псевдоэлементов(::before, ::after) для создания нового элемента;
- отслеживание состояния через псевдоклассы :checked, :focus, :focus-within;
- сброс и переопределение системного вида элемента;
- создание сложных анимаций и переходов;
- работа с свойством clip-path для нестандартных форм.

Данные способы могут быть использованы как самостоятельно, так и в различных комбинациях. Далее кратко рассмотрим каждый из них.

Связывание элементов `<input>` и `<label>` с использованием соседних селекторов соседства основной кастомизации форм. Связь элемента `<label>` с элементом `<input>` может осуществляться либо через вложение, либо с помощью атрибутов `for` и `id`. При активации элемента `<label>` браузер переводит фокус на связанный элемент `<input>` или изменяет его состояние.

Такие CSS-селекторы позволяют применять стили к элементам в зависимости от их положения относительно `<input>`. Эти селекторы позволяют модифицировать визуальное представление кастомных компонентов в зависимости от состояния скрытого нативного элемента формы (рис. 1).



Рисунок 1 – Стилизованный чекбокс

Методы визуального скрытия нативных элементов форм. После установления связи между элементами требуется устранить видимое представление нативного элемента формы при сохранении его функциональных характеристик. Наиболее распространенным методом является применение комбинации CSS-свойств `opacity: 0` и `position: absolute` (рис. 2).

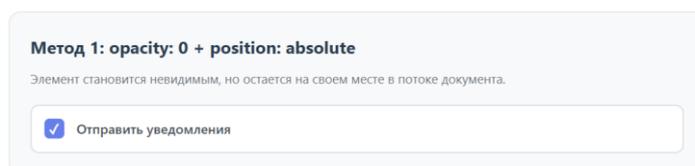


Рисунок 2 – Методы визуального скрытия нативных элементов форм

Свойство `opacity: 0` обеспечивает полную прозрачность элемента, сохраняя его присутствие в DOM-дереве и все интерактивные возможности. Элемент остается доступным для устройств ввода, программ чтения с экрана и сохраняет возможность получения фокуса. Свойство `position: absolute` исключает элемент из обычного потока документа, предотвращая влияние невидимого элемента на компоновку интерфейса.

Альтернативные методики включают установку нулевых значений для свойств `width` и `height`, применение свойства `clip-path` для гео-

метрического обрезания элемента или использование свойства `visibility: hidden`. Выбор конкретного метода определяется требованиями к доступности и особенностями компоновки интерфейса.

Применение псевдоэлементов `::before` и `::after` для построения интерфейсных компонентов. Данные псевдоэлементы представляют собой виртуальные элементы, генерируемые исключительно средствами CSS. Каждый элемент DOM может содержать до двух таких псевдоэлементов, которые располагаются соответственно перед и после его основного содержимого. Стилизация данных элементов осуществляется стандартными CSS-свойствами, включая возможности трансформации и анимации.

Обработка состояний элементов посредством CSS-псевдоклассов. CSS-псевдоклассы состояния позволяют применять стили к элементам при наступлении определенных условий без необходимости использования JavaScript. Данный механизм является критически важным для создания интерактивных компонентов форм.

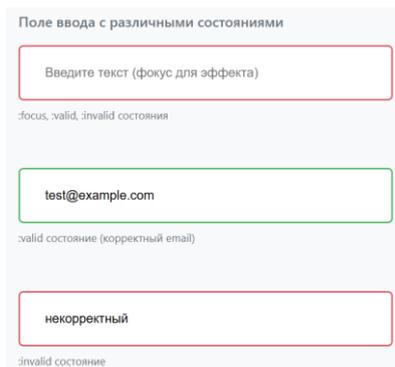
Псевдокласс `:checked` активируется при установке флажка в чекбоксах или выборе варианта в радиокнопках. Данное состояние используется для изменения визуального представления кастомных компонентов, ассоциированных с данными элементами.

Псевдокласс `:focus` применяется к элементам, получившим фокус ввода. Обеспечение видимого индикатора фокуса является обязательным требованием доступности. Данный псевдокласс позволяет кастомизировать отображение индикатора в соответствии с дизайн-системой.

Псевдокласс `:focus-within` применяется к элементам, содержащим вложенные элементы в состоянии фокуса. Это позволяет изменять стилизацию элементов при активации содержащихся в них полей ввода.

Дополнительные псевдоклассы включают `:hover` (наведение указателя), `:disabled` (неактивное состояние), `:valid` и `:invalid` (состояния валидации), `:placeholder-shown` (отображение текста-заполнителя) (рис. 3).

Отключение системного оформления элементов посредством свойства `appearance`. Свойство `appearance` предоставляет контроль над применением системно-зависимых стилей оформления к элементам форм. Значение `none` полностью отключает браузерное оформление элемента, позволяя осуществлять его полную кастомизацию средствами CSS. Свойство `accent-color` представляет собой альтернативный подход, позволяющий изменить только акцентные цвета элементов форм без полного переопределения их оформления.



**Рисунок 3 – Различные состояния полей ввода**

Реализация анимационных эффектов. Свойство `transition` определяет параметры плавного перехода между значениями CSS-свойств. Оно специфицирует свойства для анимации, продолжительность перехода, функцию временной шкалы и возможную задержку начала. Данный механизм оптимизирован браузерами для аппаратного ускорения.

Типичные применения включают плавное изменение цвета фона при наведении указателя, постепенное появление индикаторов состояния, анимированное перемещение текстовых меток.

Использование расширенных CSS-свойств для создания сложных визуальных эффектов. Свойство `clip-path` определяет область отображения элемента путем задания контура отсечения. Контур может быть задан посредством координат точек, базовых геометрических фигур или функций `path()` для произвольных SVG-путей. Данное свойство позволяет создавать элементы нестандартной геометрии без применения растровых изображений.

Таким образом, возможно создавать уникальные элементы интерфейса, соответствующие дизайн-системам, без избыточного использования JavaScript, сохраняя семантику и доступность. Это обеспечивает не только эстетические преимущества, но и практическую выгоду: снижение объема кода, улучшение производительности и упрощение поддержки. Методы, представленные в исследовании, свидетельствуют о размывании границ между стандартными и кастомными элементами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. CSS Basic User Interface Module Level 3: W3C Candidate Recommendation Draft, 21 February 2023. – URL: <https://www.w3.org/TR/css-ui-3/> (дата доступа: 18.02.2026).

2. Styling web forms: руководство / Mozilla Developer Network. – URL: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Forms/Styling\\_web\\_forms](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Forms/Styling_web_forms) (дата доступа: 19.02.2026).

## **НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ CSS ДЛЯ АДАПТИВНОЙ ВЁРСТКИ**

Адаптивная вёрстка, долгое время базировавшаяся на медиазапросах, подошла к критическому рубежу. Классический подход, привязывающий логику отображения исключительно к размерам окна браузера, демонстрирует свою недостаточность в эпоху компонентных дизайн-систем и сложных, модульных интерфейсов. Современные веб-приложения требуют более гибкой, контекстно-зависимой и предсказуемой адаптивности на уровне отдельных компонентов, а не всей страницы. Это вынуждает искать новые методологии и инструменты в рамках самого CSS, развитие которого в последние годы предоставило разработчикам мощные и нативные решения для этих задач.

Целью данного исследования является комплексный анализ ключевых современных возможностей спецификации CSS, предназначенных для создания адаптивных интерфейсов нового поколения.

В рамках работы ставится задача детально рассмотреть четыре фундаментальные технологии:

1. Контейнерные запросы (Container Queries).
2. Селектор `:has()`.
3. Каскадные слои (`@layer`).
4. Система современных логических и viewport-единиц.

Исследование направлено на выявление их практического потенциала для замены или дополнения устоявшихся подходов, а также на демонстрацию синергетического эффекта при их совместном использовании для построения устойчивых, переиспользуемых и истинно адаптивных компонентов.

Актуальность темы обусловлена завершением этапа экспериментальной поддержки рассматриваемых технологий ведущими браузерами. Их повсеместная имплементация переводит данные возможности из разряда экспериментальных в категорию промышленных стандартов, готовых к немедленному внедрению в реальные проекты. Игнорирование этих инструментов сегодня создает риск отставания в методологии разработки и увеличении стоимости поддержки кодовой базы.

Суть современного подхода заключается в переходе от адаптивности макета к адаптивности самих компонентов. Компонент должен

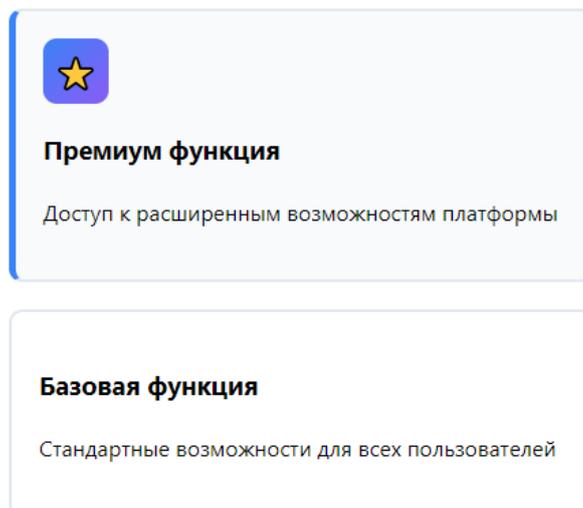
быть интеллектуальным: он должен адаптироваться не к размеру экрана, а к конкретному контексту своего расположения и внутреннему состоянию, оставаясь при этом независимым и переиспользуемым. Это достигается за счет набора новых CSS-возможностей, которые позволяют описывать такое поведение декларативно, без привлечения JavaScript.

Новые способы кардинально упрощают создание адаптивных интерфейсов. Они представляют собой целостную систему взаимодополняющих решений, охватывающих различные аспекты разработки. Ключевыми элементами этой системы являются: контейнерные запросы, переносящие логику адаптивности с уровня страницы на уровень родительского контейнера; селектор `:has()`, позволяющий компоненту реагировать на свое внутреннее содержимое; каскадные слои, решающие извечную проблему управления специфичностью и конфликтами стилей; современные единицы измерения и функции, обеспечивающие точный и гибкий контроль над размерами и типографикой в условиях разнообразных устройств и динамических интерфейсов.

Контейнерные запросы решают проблему, когда один и тот же компонент должен выглядеть по-разному в разных частях макета. Раньше для этого приходилось писать сложные медиазапросы, учитывая вложенность, или использовать JavaScript, отслеживая размеры и применяя модификаторы вроде `.card--compact`. Теперь логика инкапсулирована в сам компонент. Родительский контейнер объявляется как `container-type: inline-size;`. Далее, для самой карточки достаточно написать правило `@container (max-width: 400px) { .card { flex-direction: column; } }`, чтобы она автоматически становилась вертикальной, как только ширина её контейнера становится меньше 400px, независимо от размера всего окна. Это делает компоненты самодостаточными и переиспользуемыми в любой сетке [1].

Селектор `:has()` открывает эру контекстной стилизации, устраняя множество мелких, но раздражающих задач, решавшихся скриптами. Например, отслеживать наличие активного пункта внутри выпадающего меню для подсветки его заголовка теперь реализуется одним CSS-правилом: `.dropdown:has(.menu-item.active) { color: #2563eb; font-weight: bold; }`. Стилль применяется к элементу с классом `.dropdown` только при условии, что внутри него существует элемент с классами `.menu-item.active`. Это мощнейший инструмент для создания интерактивных форм, где поле может подсвечиваться при наличии внутри невалидного ввода (`.field:has(:invalid)`), или навигаций, динамически меняющих своё состояние. Кроме того, применение селектора `:has()` облегчит работу верстальщикам, а также повысит скорость загрузки

сайтов в случае, когда, например, необходимо стилизовать особым образом карточки, внутри которых есть иконки (рис. 1) [2].



**Рисунок 1 – Демонстрация работы селектора :has()**

Каскадные слои (`@layer`) решают фундаментальную проблему архитектуры больших проектов – управление специфичностью. Вместо борьбы с агрессивными стилями сторонних библиотек через ещё более специфичные селекторы или `!important`, разработчик теперь может явно определить порядок слоёв: `@layer reset, lib, components, utilities;`. Оборачивая стили библиотеки в `@layer lib { ... }`, а свои компоненты – в `@layer components { ... }`, можно получить гарантию, что стили из более позднего слоя (`components`) будут иметь приоритет над стилями из более раннего (`lib`). Это создаёт предсказуемую и чистую CSS-архитектуру, легко масштабируемую в больших командах (рис. 2) [3].

Современные единицы измерения и функции делают адаптивную типографику и компоновку простыми и математически точными. Вместо громоздких медиазапросов с несколькими контрольными точками для масштабирования заголовка теперь достаточно одной строки с функцией `clamp()`: `font-size: clamp(1.2rem, 4vw, 2rem);`. Это задаёт плавное изменение размера между минимальным (`1.2rem`) и максимальным (`2rem`) значением. Для корректной работы с мобильными браузерами, где высота `viewport` меняется при скролле, вместо проблематичного `100vh` используется `height: 100dvh`, что гарантирует точное заполнение именно видимой в данный момент области. Единицы `lh` и `rlh` позволяют привязывать отступы к высоте строки, создавая идеальный вертикальный ритм в тексте [4].

```

/* Объявляем порядок слоёв */
@layer lib, components;

@layer lib {
  .card { background: gray; }
}

@layer components {
  /* Этот стиль победит! */
  .card { background: blue; }
}

```

Рисунок 2 – Пример работы с правилом @layer

Таким образом, новые возможности CSS представляют собой не просто отдельные инструменты, а целостную экосистему для создания адаптивных интерфейсов следующего поколения. Они позволяют перенести логику адаптивности и интерактивности из JavaScript в декларативную область стилей, что повышает производительность, упрощает поддержку и делает компоненты по-настоящему независимыми и переиспользуемыми. Контейнерные запросы, селектор :has(), каскадные слои и современные единицы – это новая базовая реальность фронтенд-разработки. Их освоение и внедрение является не опциональным трендом, а необходимым шагом для создания современных, устойчивых и эффективных веб-приложений, отвечающих требованиям сложных пользовательских интерфейсов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. CSS container queries: [Электронный ресурс] // MDN Web Docs. – 2025. – URL: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/CSS/Guides/Containment/Container\\_queries](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/CSS/Guides/Containment/Container_queries) (дата обращения: 19.02.2026).
2. Mastering CSS Container Queries: Adaptive Layouts for Modern Web Design: [Электронный ресурс] / Superflex.ai. – 2025. – URL: <https://www.superflex.ai/blog/mastering-css-container-queries> (дата обращения: 19.02.2026).
3. Container Queries: [Электронный ресурс] // CSS-Tricks. – 2024. – URL: <https://css-tricks.com/css-container-queries/> (дата обращения: 19.02.2026).
4. Modern CSS for 2024: Nesting, Layers, and Container Queries: [Электронный ресурс] // Builder.io. – 2023. – URL: <https://www.builder.io/blog/css-2024-nesting-layers-container-queries> (дата обращения: 19.02.2026).

## ИНДЕКСИРОВАНИЕ СИМВОЛОВ КАК МЕТОД ИЗМЕНЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ СТАТИСТИКИ В ПОДСТАНОВОЧНЫХ ШИФРАХ

Вероятностная статистика – это раздел математики, который изучает закономерности случайных явлений. В лингвистике и обработке информации фундаментальным свойством является статистическая устойчивость. Согласно закону больших чисел (теореме Бернулли), при бесконечном увеличении длины текста  $N$  относительная частота появления символа всегда стремится к его истинной вероятности  $P(a)$ . Этот предел частоты выступает уникальной характеристикой, своеобразным «отпечатком», любого естественного языка. Естественные языки отличаются высокой степенью избыточности и крайне неравномерным распределением частот символов, что описывается законом Ципфа [1]. Данный закон гласит, что частота символа обратно пропорциональна его рангу. Например, в русском языке самой частой гласной является «О» с вероятностью около 10.9%. Буква «Е» встречается с частотой около 8.4%. Редкие буквы, такие как «Ф», «Щ», «Ъ», имеют частоту менее 1%. На гистограмме такое распределение выражается в наличии ярко выраженных «пиков» высокочастотных символов и «хвостов» редких символов (рис.1).

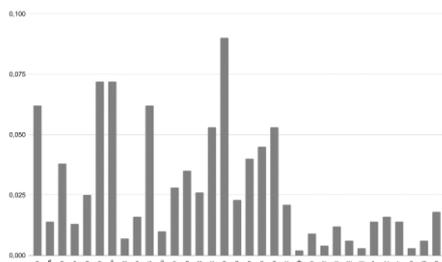


Рисунок 1 – Гистограмма распределения символов по частоте появления

Именно эти пики позволяют криптоаналитикам идентифицировать язык и буквы даже в зашифрованных сообщениях. В симметричных криптосистемах иногда применяются шифры простой замены (моноалфавитные подстановки), где каждой букве открытого текста ставится в соответствие уникальный символ шифротекста. Основная проблема таких шифров кроется в том, что операция замены является изоморфизмом относительно вероятностного распределения. Если в открытом тексте буква «О» встречается с вероятностью 10.9%, то и её заменитель в шифротексте будет иметь точно такую же вероятность.

Используя метод частотного анализа, криптоаналитик строит гистограмму шифротекста, сравнивает её с эталонной гистограммой языка и сопоставляет самые высокие «пики». Из-за этой уязвимости простые подстановочные шифры абсолютно ненадежны. Даже полиалфавитные системы (например, шифр Виженера) оставляют периодические следы, которые можно выявить методом Касиски [2].

Для решения проблемы сохранения частотного рельефа предлагается метод вероятностного разбиения. Идея базируется на отказе от отображения «один к одному» (1:1) в пользу отображения «один ко многим» (1:M) со случайным выбором конкретного варианта.

Алгоритм преобразования состоит в следующем. Вводится расширенный алфавит, состоящий из биграмм – пар исходной буквы и случайно выделенного индекса. Из входного потока читается символ и генерируется случайное целое число в заданном диапазоне с неравномерным распределением. Формируется новый символ-пара. Например, слово «СЛОВО» может быть преобразовано в последовательность «С1, Л0, О0, В2, О1». С точки зрения статистики, символы «О0» и «О1» теперь являются разными элементами расширенного алфавита. Вероятность появления такой пары определяется как произведение исходной вероятности буквы на вероятность выбора индекса (1).

$$P(Y = (x, k)) = P(X = x) \cdot P(\text{Index} = k | X = x) = P(x) \cdot \frac{1}{M}, \quad (1)$$

где  $P(X=c)$  – исходная вероятность появления буквы «х» в языке.

Таким образом, исходный частотный пик буквы разбивается на более мелкие пики, высота каждого из которых уменьшается пропорционально количеству индексов. На конечных выборках количество раз, когда букве будет присвоен конкретный индекс, подчиняется биномиальному распределению. Стандартное отклонение количества появлений конкретной пары  $(a, k)$  составляет:

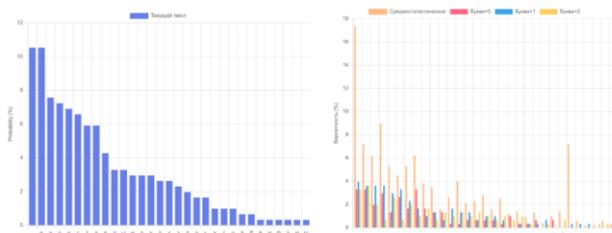
$$\sigma \approx \sqrt{N_a \cdot \frac{1}{M} \cdot \left(1 - \frac{1}{M}\right)}. \quad (2)$$

Это означает, что для редких букв возможны ситуации, когда некоторые индексы вообще не выпадут, что создает дополнительный «шум» для криптоаналитика.

В рамках исследования метод был протестирован на фрагменте текста на русском языке длиной 310 символов. Использовался диапазон из трех случайных индексов {0, 1, 2} Исходный доминирующий символ «Е» (имевший частоту 10.6%) распался на несколько подгрупп. Самая частая новая вариация «Е1» получила частоту всего

3.8%, что сопоставимо с частотой редкой исходной буквы «А». Максимальная вероятность символа в тексте упала более чем в 2 раза: с 0.1765 до 0.0784. Анализ гистограмм (рис. 2) четко показывает изменение формы распределения.

Исходный график с высокими пиками растянулся по оси X, так как количество категорий увеличилось в 3 раза. Вместо резких перепадов образовалось «плато» низких вероятностей. Это «размазывает» статистику и визуально превращает распределение в шумоподобное. Кроме того, анализ внутреннего распределения индексов показал, что для коротких выборок характерна сильная асимметрия. Этот эффект недетерминированности крайне полезен: криптоаналитик не может гарантировать равномерное представление каждого варианта буквы, что усложняет построение статистических моделей.



**Рисунок 2 – Гистограмма распределения символов до и после обработки**

Представленный метод случайного индексирования является эффективным средством предобработки текста перед его шифрованием. Перевод символов в формат вероятностных биграмм успешно разрушает устойчивые закономерности языка. Энтропия распределения возрастает, удовлетворяя принципам криптографии Шеннона по максимизации неопределенности. С увеличением числа индексов кривая распределения стремится к «белому шуму» (равномерному распределению), создавая коллизии частот и делая символы неразличимыми для классического анализа. Таким образом, простое увеличение алфавита за счет неизвестного атакующему случайного индексирования существенно усложняет частотный криптоанализ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кромер, В. В. Закон Ципфа и средняя энтропия слова [Электронный ресурс] / В. В. Кромер // Информационные технологии и математическое моделирование : материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Анжеро-Судженск, 15 нояб. 2002 г.). – Томск: Твердыня, 2002. – С. 192–194. – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/336826419\\_Zakon\\_Cipfa\\_i\\_srednaa\\_entropia\\_slova](https://www.researchgate.net/publication/336826419_Zakon_Cipfa_i_srednaa_entropia_slova), (дата доступа: 05.02.2026)

2. Бабаш, А. В. Криптография [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А. В. Бабаш, Г. П. Шанкин. – Москва : Солон-Р, 2002. – С.

154 - 157. – Режим доступа: <https://djvu.online/file/WHhaw5xgDMY9j>,  
(дата доступа: 05.02.2026 )

3. А. П. Алферов, А. Ю. Зубов, А. С. Кузьмин, А. В. Черемушкин. Основы криптографии: Учебное пособие. – Гелиос АРВ, 2002. – 480 с.

4. В.А. Долгов, В.В. Анисимов. Криптографические методы защиты информации. – ДВГУПС, 2008. – 155 с.

УДК 004.896 : 658.5

С.А. Осоко, ст. преп;

Е.С. Мирончик, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОИЗВОДСТВО**

В современном мире искусственный интеллект (ИИ) становится неотъемлемой частью производственных процессов. Однако внедрение ИИ в производство сопряжено с рядом технических и экономических вызовов, которые необходимо учитывать при разработке и реализации соответствующих проектов.

### **Технические вызовы**

1. **Интеграция ИИ с существующими системами.** Многие производственные предприятия используют устаревшие системы и оборудование, которые могут быть несовместимы с новыми технологиями ИИ. Это требует значительных усилий и ресурсов для модернизации и интеграции.

2. **Обеспечение качества и надёжности.** ИИ-системы должны обеспечивать высокое качество и надёжность работы, особенно в критически важных отраслях, таких как производство медицинских препаратов или авиационная промышленность. Необходимо проводить тщательное тестирование и сертификацию ИИ-систем перед их внедрением.

3. **Управление данными.** ИИ требует больших объёмов данных для обучения и работы. Предприятиям необходимо разработать системы сбора, хранения и обработки данных, которые соответствуют требованиям ИИ-систем. Это включает в себя обеспечение качества данных, их защиту и соблюдение нормативных требований.

4. **Разработка и обучение моделей.** Создание эффективных ИИ-моделей требует глубоких знаний и опыта в области машинного обучения, обработки естественного языка, компьютерного зрения и других областях. Предприятиям может потребоваться привлечение

внешних специалистов или инвестиции в обучение собственных сотрудников.

**5. Обеспечение безопасности.** ИИ-системы могут быть уязвимы для кибератак и других угроз. Предприятиям необходимо внедрять меры по обеспечению безопасности ИИ-систем, включая шифрование данных, аутентификацию и авторизацию пользователей, а также мониторинг и реагирование на инциденты.

**6. Наличие свободных энергоресурсов.** Для работы дата-центров по работе с ИИ нужен значительный объем электрической энергии. Электроэнергия потребляется по трем основным направлениям:

– **Вычисления.** Каждый процессор в дата-центре работает круглосуточно, обрабатывая огромные объемы данных. Для решения сложных алгоритмов требуются мощные графические ускорители и специализированные чипы, которые расходуют значительное количество электричества даже в режиме ожидания.

– **Охлаждение.** Серверы выделяют большое количество тепла, которое необходимо отводить для предотвращения перегрева. Современные системы охлаждения включают жидкостные контуры, вентиляторы и кондиционеры, работающие постоянно, что также увеличивает потребление энергии.

– **Резервирование питания.** Для повышения надежности работы дата-центров используются резервные генераторы и батареи, обеспечивающие непрерывность функционирования даже при отключениях основного энергоснабжения. Это дополнительное оборудование требует постоянной готовности и регулярной проверки, что дополнительно повышает энергопотребление.

За последние десять лет потребление электроэнергии дата-центров выросло втрое. Этот рост обусловлен расширением использования искусственного интеллекта и увеличением объема обрабатываемых данных. По данным на конец 2024 года в США производство электроэнергии-нетто составляло 4308,634 млрд кВт·ч (без учета малых солнечных станций), а потребление электроэнергии: 4110,42 млрд кВт·ч. Примерно 4% потребляемой электроэнергии используют дата-центры. При этом по данным, представленным в публикациях Института компьютерной техники Университета Беркли и ежегодных докладах Министерства энергетики США, от 40 до 50% всей потребляемой электроэнергии в американских дата-центрах приходится именно на системы охлаждения. Прогнозируется, что к 2028 году это потребление увеличится и составит от 6,7% до 12% от общего объема электроэнергии США.

Министерство энергетики США реализует ряд инициатив для покрытия возрастающего спроса на электроэнергию:

- Развитие локального производства и хранения энергии.
- Перепрофилирование заброшенных угольных шахт под размещение дата-центров.
- Создание новых тарифов для поощрения роста дата-центров.
- Коммерческое использование перспективных технологий, включая геотермальную энергию и продвинутое полупроводники.

#### **Экономические вызовы**

**1. Высокие затраты на внедрение.** Внедрение ИИ в производство требует значительных инвестиций в технологии, оборудование, обучение сотрудников и модернизацию инфраструктуры. Это может стать серьёзным препятствием для небольших и средних предприятий.

**2. Оценка эффективности и окупаемости.** Предприятиям необходимо разработать методы оценки эффективности и окупаемости инвестиций в ИИ. Это включает в себя анализ затрат и выгод, расчёт показателей рентабельности и срока окупаемости.

**3. Изменение структуры затрат.** Внедрение ИИ может привести к изменению структуры затрат на производство. Например, предприятия могут сократить расходы на труд за счёт автоматизации рутинных задач, но при этом увеличить расходы на технологии и обслуживание ИИ-систем.

**4. Необходимость переквалификации сотрудников.** Внедрение ИИ может потребовать от сотрудников новых навыков и компетенций. Предприятиям необходимо инвестировать в обучение и развитие сотрудников, чтобы обеспечить эффективную работу в новых условиях.

**5. Риски и неопределённость.** Внедрение ИИ сопряжено с рисками и неопределённостью, особенно в условиях быстро меняющегося рынка и технологий. Предприятиям необходимо разрабатывать стратегии управления рисками и адаптации к изменениям.

**6. Наличие доступных финансов.** Количество вложенных средств в настоящее время, может быть возвращено в далекой перспективе, если вообще возможно.

#### **Заключение**

Внедрение искусственного интеллекта в производство имеет огромный потенциал для повышения эффективности, снижения затрат и улучшения качества продукции. Однако для успешного внедрения необходимо учитывать и преодолевать технические и экономические вызовы. Предприятиям необходимо разрабатывать комплексные стратегии, которые включают в себя модернизацию инфраструктуры, инвестиции в технологии, обучение сотрудников и оценку эффективности. Только так можно обеспечить успешное внедрение ИИ и получить максимальную выгоду от его использования.

## **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СОЗДАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ: ИНСТРУМЕНТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ**

В современном мире существует множество инструментов для создания документации. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, которые важно учитывать при выборе наиболее подходящего инструмента. В этой статье мы рассмотрим четыре популярных инструмента: LaTeX, Microsoft Word, Markdown и Typst.

LaTeX представляет собой систему компьютерной верстки, получившую широкое распространение при подготовке научно-технических публикаций. Данная система обеспечивает эффективное создание комплексных элементов, таких как математические выражения, таблицы, графики и прочие компоненты, необходимые для оформления академических материалов.

Microsoft Word является распространенным текстовым процессором, используемым для подготовки разнообразной документации, включая рабочие инструкции и отчетные документы. Программа обладает обширным функционалом, включающим инструменты для редактирования и форматирования текста, обработки табличных данных, добавления иллюстраций и множества иных возможностей.

Markdown выступает в роли легкого инструмента разметки, предназначенного для быстрого создания структурированных документов минимальными усилиями. Этот формат часто применяется для разработки файлов README, ведения веб-журналов и написания коротких статей.

Typst представляет собой инновационный инструмент для документирования, объединяющий лаконичность синтаксиса Markdown с функциональностью продвинутых систем, аналогичных LaTeX. Он характеризуется удобным интерфейсом, позволяющим быстро формировать научные публикации посредством простого языка разметки, сохраняя при этом способность воспроизводить сложные математические уравнения и другие специфичные объекты.

Ниже приведено детальное сопоставление характеристик представленных продуктов по ряду ключевых критериев с целью выявления особенностей каждой системы и обоснования оптимального выбора инструментария в зависимости от конкретных требований и условий эксплуатации. Результаты сравнения представлены в табл.

1-4. В табл. 1 представлены общие критерии оценки этих программных средств.

**Таблица 1 – Общие критерии оценки**

Критерий	LaTeX	Microsoft Word	Markdown	Typst
Требования к компьютеру	Низкие	Средние	Очень низкие	Низкие
Сложность синтаксиса	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Работа с текстом	Отличная	Хорошая	Хорошая	Отличная
Таблицы	Хорошая	Отличная	Ограниченная	Хорошая
Картинки	Хорошая	Отличная	Ограниченная	Хорошая
Графики и диаграммы	Хорошая	Отличная	Ограниченная	Хорошая
Создание математических формул	Отличная	Хорошая	Ограниченная	Отличная
Удобство работы с страницами	Хорошее	Отличное	Ограниченное	Хорошее
Создание содержания	Автоматизировано	Автоматизировано	Частично автомат.	Автоматизировано

В табл. 2 представлено сравнение удобства работы с диаграммами и графиками в программах

**Таблица 2 – Сравнительные характеристики работы с диаграммами**

Критерий	LaTeX	Microsoft Word	Markdown	Typst
Встроенные инструменты	Пакеты (tikz, pgfplots)	Мастер диаграмм и графика	Внешние библиотеки (MathJax, KaTeX)	Пакеты (аналогичные tikz)
Кривая обучения	Высокая	Средняя	Низкая	Средняя
Настраиваемость	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая
Совместимость	PDF, DVI, PS	Много форматов	HTML, PDF	PDF, HTML
Интеграция с данными	Через скрипты	Импорт данных	Внешние инструменты	Скрипты
Поддержка интерактивных элементов	Ограниченная	Хорошая	Нет	Ограниченная
Качество вывода	Отличное	Хорошее	Зависит от рендера	Отличное

В табл. 3 представлено сравнение удобства работы с таблицами.

**Таблица 3 – Сравнительные характеристики работы с таблицами**

Критерий	LaTeX	Microsoft Word	Markdown	Typst
Интерфейс	Текстовый	Графический	Текстовый	Текстовый + WYSIWYG
Простота базовых таблиц	★★☆☆	★★★★	★★☆☆	★★★★
Настройка внешнего вида	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★
Управление размерами	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★
Интеграция с данными	★★★★	★★★☆☆	★★☆☆	★★★★
Экспорт и совместимость	★★★★	★★★★	★★☆☆	★★★★

В табл. 4 представлены критерии оценки удобства создания математических формул.

**Таблица 4 – Сравнительные характеристики работы с формулами**

Критерий	LaTeX	Microsoft Word	Markdown	Typst
Поддерживаемые команды	Полностью	Частично	Ограниченно	Хорошее покрытие
Легкость использования	Сложная	Ограниченная	Минимальная	Средняя сложность
Автоматизация	Отличная	Ограниченная	Минимальная	Достаточно хорошая
Совместимость и экспорт	Высокая	Удовлетворительная	Умеренная	Достаточная
Качество отображения	Высокая	Удовлетворительная	Умеренная	Достаточная

### **Заключение.**

LaTeX зарекомендовала себя как наиболее подходящее решение для формирования научно-технических документов, особенно тех, которые содержат большое количество формул, графиков и ссылок. Однако использование LaTeX требует определенных навыков программирования и понимания структуры исходного файла, что может затруднить освоение программы начинающими пользователями.

Microsoft Word удобен для повседневного использования благодаря интуитивному интерфейсу и широкому спектру встроенных инструментов. Тем не менее, для крупных проектов с множеством математических формул и сложной структурой содержание документация в Word становится неудобной из-за возможных проблем с выравниванием и обновлением индексов.

Markdown идеально подходит для быстрых заметок, технических спецификаций и простых инструкций. Однако отсутствие встроенной поддержки сложных макетов и недостаточная автоматизация индексации ограничивают применение Markdown для масштабных проектных документов.

Typst представляет собой новое поколение инструментов, сочетающих удобство Markdown с возможностями LaTeX. Недостатком на сегодняшний день является относительная новизна продукта и меньшая популярность среди научного сообщества по сравнению с традиционными решениями вроде LaTeX.

Таким образом, выбор конкретного инструмента зависит от характера проекта, уровня требуемого контроля над оформлением и потребностей команды разработчиков. Для специализированных задач с большим объемом математики и статистики предпочтительным решением остается LaTeX. Если же речь идет о создании обычных документов общего назначения, оптимальным выбором станет Microsoft Word. Когда важна простота реализации и скорость прототипирования, целесообразно применять Markdown. Наконец, в ситуациях, когда важны простота и функциональность одновременно, перспективным вариантом представляется Typst.

УДК 004.059

Е.В. Обухова, маг.; Н.П. Шутько, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСКОДИРОВАНИЯ ВИДЕО НА БАЗЕ MOVIEPY И FFMPEG**

Выбор оптимального программного решения является определяющим фактором для достижения требуемых характеристик видео при его преобразовании. Целью данной работы является сравнительная оценка производительности, ресурсоемкости качества видеопотока, формируемого в процессе транскодирования с использованием разработанных на языке Python программных модулей: на основе библиотеки MoviePy (далее – модуль А) и на базе фреймворка Ffmpeg (далее – модуль Б). Анализ и сопоставление полученных данных позволят определить наиболее эффективную реализацию для включения в состав плагина транскодирования видеороликов в формат Theora для игрового движка Ren'Py.

Рассмотрим техническую часть реализованных модулей и сравним их по следующим аспектам: организация конвейера обработки,

управление выделяемой оперативной памятью и гибкость настройки параметров кодирования. Важно отметить, что для реализации модулей использовались библиотека MoviePy версии 2.2.1 и фреймворк FFmpeg версии 7.1.1

Первым пунктом сравнения является организация конвейера обработки получаемых данных. Модуль А манипулирует видеопотоком, представляющим собой коллекцию независимых кадров [1]. Для сборки видеопоследовательности используется встроенный класс ImageSequenceClip, который инкапсулирует логику управления кадрами (листинг 1).

```
def convert(video_frames: list[np.ndarray], ...):  
    video_clip = ImageSequenceClip(video_frames, fps=fps)
```

#### **Листинг 1 – Обработка данных модулем А**

В модуле Б полученные кадры передаются последовательно, исключая необходимость в предварительной загрузке всего видеопотока в оперативную память (листинг 2).

```
for frame in frame_generator:  
    clean_data = np.ascontiguousarray(frame[:, :, :3],  
    dtype=np.uint8).tobytes()  
    process.stdin.write(clean_data)
```

#### **Листинг 2 – Обработка данных модулем Б**

Следующим критерием анализа выступает управление выделяемой оперативной памятью. В модуле А библиотека MoviePy берет управление временными файлами на себя, однако, до начала кодирования передаваемая последовательность несжатых кадров должна быть помещена в структуру list[np.ndarray]. Вследствие этого объем потребляемой памяти растет линейно и зависит от общего количества полученных кадров и их пространственного разрешения. Подобный рост вычислительной сложности создает повышенную нагрузку на аппаратные ресурсы. Напротив, при использовании модуля Б в памяти в каждый момент времени удерживается только один несжатый видеокادر, что снижает нагрузку на ОЗУ.

Настройка параметров кодирования в модуле А осуществляется через метод write\_videofile(), который предоставляет разработчику доступ только к базовым параметрам, таким как битрейт, частота кадров, тип кодека и иными параметрами (листинг 3). MoviePy автоматизирует вычисление иных настроек, что минимизирует вероятность возникновения ошибок конфигурации.

```
vid-  
eo_clip.write_videofile(output_filepath, codec="libtheora", a
```

```
audio_codec="libvorbis", fps=fps, bitrate="8000k", audio_bitrate="320k")
```

### Листинг 3 – Настройка параметров кодирования в модуле А

В модуле Б формирование цепочки фильтров происходит вручную, что обеспечивает точный контроль над масштабированием, геометрией кадра и иными параметрами трансформации видеопотока. Управление параметрами в модуле Б представлено в листинге 4.

```
ffmpeg_cmd.extend(['-c:v', 'libtheora', '-q:v', '8', '-g', '1', '-vf', 'scale=1920:1080:force_original_aspect_ratio=decrease,pad=1920:1080:(ow-iw)/2:(oh-ih)/2,format=yuv420p']
```

### Листинг 4 – Настройка параметров кодирования в модуле Б

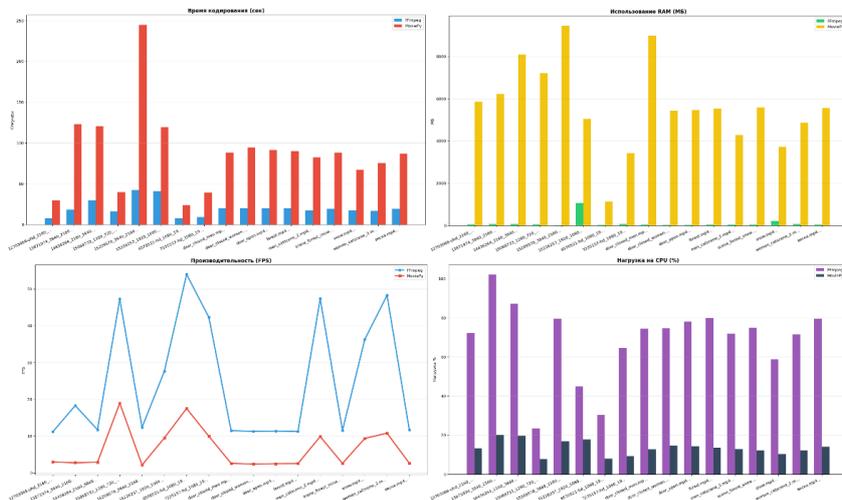
Для оценки эффективности разработанных модулей была проведена серия экспериментов по транскодированию набора данных, состоящего из 17 видеороликов с различными характеристиками: пространственным разрешением, размером файла, частотой кадров и типом контента (натурная съемка и 2D-анимация). В таблице приведен фрагмент полученных данных. Далее, на их основе был проведен сравнительный анализ показателей обоих модулей. Для графической интерпретации результатов использовалась библиотека Matplotlib (рис. 1).

**Таблица – Фрагмент сводных данных транскодирования тестовых видеороликов**

Файл	Метод	Время кодирования (сек)	Исходный размер (МБ)	Новый размер (МБ)	CPU (%)	RAM (МБ)	Битрейт (кбит/с)	FPS обработки
1387.m p4	FFmpeg	18.39	54.38	88.5	102.1	65.2	51733	18.27
	MoviePy	122.97	54.38	15.29	20.1	6223.1	8935	2.73
веска. mp4	FFmpeg	19.24	16.19	21.41	79.5	39.4	19490	11.69
	MoviePy	86.58	16.19	9.06	14.1	5549.9	8249	2.6

Анализ результатов показал, что общее время транскодирования модулем Б составило 340,64 сек. (25 FPS) – это быстрее в 4,4 раза, чем с использованием модуля А (1502,79 сек., 6.56 FPS). Низкая скорость последнего обусловлена использованием библиотеки MoviePy, которая вызывает фреймворк FFmpeg в качестве внешнего подпроцесса для обработки данных, что существенно увеличивает итоговое время. В вопросе потребления ресурсов модуль Б также эффективнее: в среднем 110,4 МБ против 5633,4 МБ у модуля А. Такая разница вызвана тем, что метод ImageSequenceClip в модуле А загружает массив кадров в ОЗУ целиком, тогда как модуль Б работает в поточном режиме, удерживая в памяти только один текущий кадр. Загрузка процессора модулем Б выше (68%), чем при использовании модуля А

(13,5%). Это объясняется способностью FFmpeg распределять задачи кодирования на все ядра устройства. Модуль А же ограничен однопоточностью, что препятствует полной загрузке вычислительных мощностей.



**Рисунок 1 – Графическая интерпретация результатов**

Дополнительно был проведен визуальный анализ видео, получившихся в ходе транскодирования. Для этого выбраны образцы натурной видеосъемки и 2D-анимации, характеризующиеся высоким качеством и отсутствием артефактов. На рисунке 2 приведены видеокadres после транскодирования модулем А (слева) и модулем Б (справа).

При анализе результатов транскодирования модулем А можно заметить явные изменения в кадрах видео, а именно: появление ступенчатых градиентов, наличие цифрового шума в тенях, общее искажение цветопередачи. В 2D-анимации с высокой долей статических кадров дефекты менее выражены, однако на светлых участках прослеживаются ступенчатые переходы между оттенками и черные пиксели. Видеопоток, полученный с помощью модуля Б, не содержит видимых артефактов, за исключением незначительного сдвига цветового тона.



**Рисунок 2 – Кадры полученных видео**

Таким образом, для получения удовлетворительного результата при транскодировании видео, следует использовать модуль Б. Он позволяет точно управлять параметрами, обеспечивает высокую скорость обработки и сохранение визуального качества. Однако при использовании данного модуля возможен рост объема выходного файла (до 5 раз). Модуль А же целесообразно применять исключительно для контента с большим количеством статичных кадров, где он демонстрирует четырехкратное сжатие при сохранении приемлемого качества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обухова, Е. В., Н. П. Шутько Разработка модуля конвертации видеороликов на основе библиотеки Movieru и фреймворка ffmpeg // Передовые технологии и инновации в образовании и науке для улучшения качества жизни и стимулирования устойчивого экономического роста: Сборник статей VIII Международной научно-технической конференции. В 3-х томах, Минск, 03–05 декабря 2025 года. – Минск: БГТУ, 2025. – С. 454-460.

УДК 004.932.2

В.А. Ворошень, маг.;  
Д.М. Романенко, зав. кафедрой ИиВД  
(БГТУ, г. Минск)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКЦЕНТНЫХ ЦВЕТОВ НА РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Одним из композиционных средств, используемых при построении кадра, является акцент. Он представляет собой некоторую цветовую область на изображении, которая существенно отличается от прочих по цветовым характеристикам (например, по тону, яркости или насыщенности). В ряде задач компьютерного зрения может быть полезной автоматическая сегментация акцентных областей. Среди подобных наиболее интересной является задача анализа композиции растровых изображений с художественной точки зрения.

Какой же цвет считается акцентным? В рамках данного исследования такой цвет должен удовлетворять следующим признакам:

- далёк от медианного цвета, признанного фоновым;
- имеет достаточно крупную площадь, чтобы быть заметным (не менее 0,5% всей площади изображения);

– имеет наибольшую оценку, которая рассчитывается на основе медианного абсолютного отклонения и будет описана далее.

Предложенный метод определения акцентных цветов предполагает выделение цветowych областей изображения.

Математической моделью пикселя растрового изображения можно считать трёхкомпонентный вектор, где каждое число описывает компоненту цвета в пространстве RGB. Само же изображение можно представить, как матрицу элементов-векторов. Разницу между двумя векторами можно найти с помощью евклидова расстояния [1]:

$$\Delta E = \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2},$$

где R, G, B – компоненты сравниваемых цветowych векторов.

Цветовые области удобно выделять, используя алгоритм выращивания регионов (region growing) [2] и поиск в ширину. Основным параметром, который влияет на результативность метода, является значение порога  $t$ , определяющееся экспериментально. Оно показывает, насколько отличными должны быть два пикселя, чтобы принадлежать разным областям.

Выращивание регионов было реализовано с использованием языка программирования Python. Была создана функция `region_growing()`, принимающая на вход изображение в виде numpy-массива, а также порог  $t$ , по умолчанию равный 100. Каждый регион для удобства заливался усреднённым цветом. Результаты работы функции на примере некоторых изображений показаны на рис. 1: слева представлены исходные изображения, а справа – модифицированные по алгоритму выращивания регионов.



**Рисунок 1 – Результат применения выращивания регионов для изображений**

Как видно, на изображениях сформировались однотонные области. Среди этих областей могут присутствовать те, которые содержат акцентные цвета, оставшиеся же области в рамках данного исследования названы фоновыми. С их помощью можно получить карту фона, то есть сегментировать изображение на два класса (фон и не-фон).

Выделению акцентных цветов предшествует построение карты фона. При этом используются медиана  $MED$  и медианное абсолютное отклонение  $MAD$ , рассчитываемые следующим образом:

$$MAD = MED(|X_i - \tilde{X}|),$$

где  $X_i$  –  $i$ -ое значение, а  $\tilde{X}$  – среднее значение величины, для которой считается медианное абсолютное отклонение.

Построение карты фона осуществляется по следующему алгоритму, который реализован в функции `background_map()`.

1. Для каждой области находится среднее арифметическое  $a$  всех её цветов, из чего формируется вектор  $A$ .
2. На основе  $A$  вычисляется медиана  $m$  цветов областей.
3. Вычисляется вектор  $D$ , содержащий значения евклидова расстояния каждого элемента  $A$  до  $m$ .
4. Выбирается параметр  $k$ , по умолчанию равный 1,5.
5. По следующей формуле рассчитывается порог фона  $T$ :

$$T = MED(D) + k \cdot MAD(D).$$

6. Формируется маска фона  $A'$ , где каждый элемент представляет собой число, либо 255 (фон), либо 0 (не-фон).

7. На основе маски формируется изображение карты фона. Результат работы функции `background_map()` для некоторых изображений показан на рис. 2.



Рисунок 2 – Карты фона для изображений

Поскольку акцентные цвета не должны находиться среди фоновых областей, карта фона существенно ограничивает набор областей, по которым осуществляется поиск акцентов.

Определение акцентов реализовано в функции `define_accents()` согласно следующему алгоритму:

1. Из набора областей, не являющихся фоновыми, исключаются области, занимающие меньше 0,5% площади изображения.

2. Все цвета оставшихся областей переводятся в цветовое пространство Lab (а именно CIELAB), поскольку Lab является perceptually равномерным пространством [3].

3. Проводится кластеризация цветов с помощью метода k-средних до заданного числа кластеров  $n$  (по умолчанию равно 3, но не больше, чем всего цветов в рассматриваемых областях).

4. Для каждого кластера рассчитывается по следующей формуле, основанной на медианном абсолютном отклонении, оценка  $E$ :

$$E = AVG(MED(D) \cdot \sqrt{S}),$$

где  $AVG$  – среднее арифметическое,  $N$  – число областей, не принадлежащих фону,  $S$  – площадь области (количество её пикселей).

Оценка  $E$  обозначает степень отличия рассматриваемого цвета от фона. В формуле учитываются расстояние от медианного цвета фона и размер области, поскольку чем больше область акцентного оттенка, тем проще человеку её заметить, а квадратный корень позволяет уменьшить её влияние на итоговый результат, чтобы большие области, меньше отличающиеся от фона, не оказывали чрезмерное влияние.

Акцентным признаётся цвет, имеющий наибольшую оценку  $E$ , и переводится обратно в RGB для удобства дальнейшей работы.

Результат работы функции `define_accents()` для некоторых изображений показан на рис. 3.



Рисунок 3 – Акцентные цвета изображений

Однако для некоторых изображений (рис. 4) метод работает непредсказуемо (слева), а для некоторых – вовсе некорректно (справа). Это связано с тем, что изображения имеют достаточно разнообразный и пёстрый фон, из-за чего евклидово расстояние до усреднённых цветов областей даёт неочевидные результаты.



**Рисунок 4 – Некорректная работа метода**

Таким образом, можно сказать, что выделение акцентных цветов для изображений, имеющих высокий контраст между фоном и акцентным цветом с использованием представленного метода, работает корректно и позволяет регулировать точность выделения с помощью параметров  $t$  и  $k$ . Однако в случае низкой контрастности и общей насыщенности всех оттенков результаты могут быть неточны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang L., Zhang Y., Feng J. On the Euclidean distance of images // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2005. Vol. 27, no. 8. P. 1334–1339.
2. Adams R., Bischof L. Seeded region growing // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 1994. Vol. 16. no. 6. P. 641–647.
3. CIE International Commission on Illumination, Recommendations on Uniform Color Spaces, Color-Difference Equations, Psychometric Color Terms, Supplement. No. 2 to CIE Publication No. 15, Colorimetry, 1971.

УДК 004.056.55:004.627

Н.В. Попеня, ст. преп.  
(БГТУ, г. Минск)

#### **СТРУКТУРА ГИБРИДНОГО МЕТОДА ЗАЩИТЫ АВТОРСКИХ ПРАВ НА МУЛЬТИМЕДИЙНЫЙ КОНТЕНТ**

Стремительный рост объемов мультимедийного трафика в глобальных сетях, который по прогнозам составляет более 80% от всего интернет-трафика [1], обостряет проблему защиты авторских прав на цифровой контент. Традиционные криптографические средства и системы управления цифровыми правами (DRM) обеспечивают защиту преимущественно на этапе передачи данных, оставляя контент уязвимым для копирования. В связи с этим актуальным направлением является применение методов компьютерной стеганографии, позволяю-

щих скрытно и неотделимо внедрять маркеры авторства непосредственно в медиаданные [2].

Ключевым препятствием для внедрения стеганографических систем является использование стандартов сжатия с потерями, таких как H.264/AVC для видео и AAC для аудио. Алгоритмы квантования, лежащие в их основе, удаляют психовизуальную и психоакустическую избыточность, что приводит к необратимому разрушению информации, встроенной классическими методами пространственной области. Анализ предметной области показывает, что большинство существующих робастных алгоритмов функционируют изолированно, защищая либо только видеоряд, либо только аудиоряд, что снижает общую надежность системы [3].

Предлагаемый метод базируется на концепции декомпозиции мультимедийного контейнера и независимой адаптивной обработки его составляющих. В отличие от монолитных подходов, архитектура разработанной системы предполагает разделение исходного файла на элементарные потоки (демультиплексирование) с последующим параллельным встраиванием данных. Для видеопотока применяется адаптивная модуляция индекса квантования (QIM) коэффициентов дискретного косинусного преобразования (DCT), использующая анализ движения и текстуры. Для аудиопотока используется метод эхочодирования с адаптивным кепстральным анализом [4].

Важной структурной особенностью метода является реализация механизма криптографической связки. Данный подход подразумевает перекрестный контроль целостности: верификационные данные видеопотока могут быть встроены в аудиопоток, и наоборот. В результате, для успешного удаления авторской метки злоумышленнику необходимо подвергнуть деструктивной атаке все составляющие медиаконтейнера, что делает атаку нецелесообразной из-за критической потери качества контента.

Для строгого описания процессов защиты разработана теоретико-множественная модель гибридной стegosистемы  $\Sigma$ , которая представляется кортежем:

$$\Sigma = \langle C, D, M, P, K, F, F^{-1}, S \rangle, \quad (1)$$

где  $C$  – множество исходных контейнеров;

$D$  – преобразование декомпозиции на видео- и аудиосегменты;

$M$  – множество авторских сообщений;

$P$  – процедура подготовки данных;

$K$  – пространство ключей;

$F$  и  $F^{-1}$  – функции встраивания и извлечения;

$S$  – множество результирующих стегоконтейнеров.

Особое внимание в структуре метода уделено предварительной подготовке данных. Для обеспечения инвариантности авторской метки к битовым ошибкам применяется каскадная схема обработки. Она включает сериализацию данных в компактный бинарный формат, помехоустойчивое кодирование для исправления одиночных инверсий и симметричное шифрование для обеспечения конфиденциальности. Сама структура данных оптимизирована и содержит блоки идентификации автора и контента, временную метку и контрольную сумму CRC32 [5].

Адаптивный характер метода требует управления сложным набором параметров, что отражено в структуре стегоключа К. Он объединяет три функциональных подмножества: параметры шифрования и кодирования; пороговые значения детекторов движения и энергии для выбора областей встраивания; параметры силы встраивания, такие как шаг квантования и амплитуда эха. Такая детализация позволяет гибко настраивать баланс между робастностью и скрытностью системы в зависимости от требований к качеству контента.

Реализация предложенной структуры базируется на использовании специализированных алгоритмов для каждого типа медиаданных, учитывающих их психовизуальные и психоакустические особенности. Для видеоканала разработан и применен двухпроходный алгоритм адаптивной стеганографии. На первом, аналитическом этапе, производится оценка межкадрового движения с использованием алгоритма Лукаса-Канаде и анализ внутрикадровой текстуры с помощью оператора Лапласа. Это позволяет сформировать карту пригодности областей, исключая динамичные сцены, где артефакты сжатия наиболее вероятны. Непосредственное встраивание осуществляется на втором этапе методом модуляции индекса квантования (QIM) коэффициентов дискретного косинусного преобразования (DCT). Ключевой особенностью здесь является динамическое изменение шага квантования: в текстурированных областях он увеличивается для повышения робастности, а в гладких – уменьшается для обеспечения скрытности.

Параллельно в аудиоканале реализуется метод эхо-кодирования, который использует временную задержку сигнала для кодирования битов информации. Для преодоления проблемы искажения амплитуды эха, возникающей при сжатии кодеком AAC, в структуру детектора введен блок адаптивного кепстрального анализа. Порог детектирования информационного пика в кепстре не является фиксированным, а вычисляется динамически для каждого аудиофрейма на основе статистики фонового шума. Такой подход позволяет минимизировать вероятность ложных срабатываний и уверенно извлекать данные даже из зашумленного сигнала [4].

Экспериментальная апробация разработанной структуры проводилась путем моделирования атак сжатия с использованием современных стандартов кодирования. Тестовая выборка включала видеопоследовательности высокого разрешения и разнородные аудиофрагменты. Для видеопотока применялась компрессия кодеком H.264/AVC (реализация libx264) со средним битрейтом 10 000 кбит/с. Для аудиопотока использовался кодек AAC с битрейтом 256 кбит/с, что соответствует стандартному качеству стриминговых платформ.

Результаты экспериментов показали высокую эффективность предложенного гибридного подхода. Средний коэффициент битовых ошибок (BER) для видеоканала составил менее 10%, а для аудиоканала – менее 6%. Полученные значения ошибок находятся в пределах корректирующей способности примененных на этапе подготовки данных. Это означает, что после декодирования помехоустойчивого кода результирующая авторская метка восстанавливается полностью без искажений. Таким образом, подтверждена способность системы сохранять целостность встроенной информации в условиях агрессивной среды передачи, характерной для современных видеохостингов.

Предложенный подход преодолевает ограничения традиционных одноканальных методов за счет одновременного использования информационных ресурсов видео- и аудиопотоков, объединенных механизмом криптографической связки.

Формализация математической модели системы и структуры многокомпонентного ключа позволила реализовать адаптивное управление параметрами встраивания, учитывающее локальные характеристики сигнала (динамику, текстуру, энергию). Сочетание разработанной методики предварительной подготовки данных, включающей помехоустойчивое кодирование, с адаптивными алгоритмами модуляции DCT-коэффициентов и кепстрального анализа обеспечило инвариантность скрытых меток к воздействию современных алгоритмов сжатия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper [Электронный ресурс] / Cisco. – San Jose : Cisco Systems, 2020. – Режим доступа: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>. – Дата доступа: 09.02.2026.
2. Cox, I. J. Digital Watermarking and Steganography / I. J. Cox [et al.]. – 2nd ed. – Burlington : Morgan Kaufmann, 2008. – 593 p.
3. Al-Nabhani, A. Robust Video Watermarking: A Review [Электронный ресурс] / A. Al-Nabhani, H. Al-Mawali, H. Jalab // Inter-

national Journal of Computer Science Issues. – 2016. – Vol. 13, Issue 6. – P. 32–40. – URL: <https://ijcsi.org/papers/IJCSI-13-6-32-40.pdf>. – Дата доступа: 09.02.2026.

4. Попеня Н.В., Романенко Д. В. Метод аудиостеганографии для AAC-сжатых аудиосигналов на основе эхо-кодирования и адаптивного кепстрального анализа // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 2 (296). С. 110–119.

5. Попеня Н.В. Методика подготовки и структура авторских данных для защиты видеофайла методами стеганографии // Труды БГТУ. Сер. 4, Принт- и медиатехнологии. 2025. № 2 (297). С. 71–77.

УДК 004.43

М.Ф. Кудлацкая, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## УПРАВЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫМ СОСТОЯНИЕМ В REACT-ПРИЛОЖЕНИЯХ

В течение длительного периода стандартом для управления данными в React-приложениях являлась библиотека Redux. Это сформировало архитектурную парадигму, предполагающую хранение всех типов данных – от бизнес-сущностей до состояния UI-компонентов – в едином глобальном дереве состояния (Store). Однако эволюция React, в частности внедрение Hooks API и Context API, а также рост сложности клиентских интерфейсов, выявили ряд системных ограничений монолитного подхода [1]:

- избыточность шаблонного кода (Boilerplate);
- накладные расходы на производительность;
- нарушение принципа разделения ответственности.

Ключевым трендом современной frontend-разработки стало четкое разграничение двух категорий данных: состояния сервера (Server State) и состояния клиента (Client State).

1. Client State: синхронные, локальные данные, полностью контролируемые клиентским приложением (темы оформления, состояние модальных окон, данные форм).

2. Server State: асинхронные данные, персистентно хранящиеся на удаленном сервере. Клиент владеет лишь их проекцией, которая может устареть в любой момент времени.

Попытки управлять серверным состоянием посредством универсальных менеджеров (например, Redux) требуют ручной реализации механизмов загрузки, кэширования, дедубликации запросов и инвалидации данных.

Внедрение библиотек класса TanStack Query (React Query) позволяет делегировать управление серверным состоянием специализированным инструментам. Данные библиотеки автоматизируют: кэширование и фоновую синхронизацию данных, управление жизненным циклом запроса (loading, error, success), дедупликацию сетевых запросов. Исключение серверных данных из глобального UI-хранилища позволяет сократить объем кода, отвечающего за управление состоянием, на 30–50% [2].

После делегирования работы с серверными данными специализированным утилитами, возникает вопрос выбора инструмента для управления оставшимся UI-состоянием. Ниже приведен сравнительный анализ ключевых решений.

1. React Context API. Нативное решение, встроенное в библиотеку React. Преимуществом является отсутствие внешних зависимостей, интеграция на уровне ядра React. Однако есть проблемы с производительностью при частых обновлениях. Изменение значения контекста провоцирует повторный рендеринг всех компонентов-потребителей [3], даже если им необходима лишь часть данных. Применяется для редко изменяемых данных (темы, локализация, данные авторизованного пользователя). Не рекомендуется для высокочастотных обновлений.

2. Redux Toolkit (RTK). Индустриальный стандарт, адаптированный под современные требования Developer Experience. RTK нивелировал проблему избыточного кода за счет внедрения createSlice и интеграции библиотеки Immer для упрощения работы с иммутабельными данными [2]. К преимуществам относятся предсказуемость потока данных, мощные инструменты отладки, развитая экосистема, наличие RTK Query. Недостатком является высокий порог входа и концептуальная сложность, часто избыточная для небольших и средних проектов.

3. Zustand. Легковесная библиотека, реализующая минималистичный подход к управлению состоянием. Упрощенный менеджер состояния, работающий на базе хуков и не требующий оборачивания приложения в провайдеры контекста. Имеет лаконичный API, полную поддержку TypeScript, возможность использования вне React-компонентов. Оптимальный выбор для большинства проектов средней сложности, где функционал Redux избыточен.

4. Recoil. Решение от Meta, разработанное для высоконагруженных интерфейсов. Состояние моделируется не как дерево, а как ориентированный граф. Узлами графа выступают Атомы (единицы состояния) и Селекторы (чистые функции преобразования). Ключевой осо-

бенностью является автоматический пересчет производных данных. При изменении атома селектор обновляет значение, и перерисовка происходит точно только в подписанных компонентах. Используется в приложениях со сложной взаимозависимостью данных (графические редакторы, дашборды, электронные таблицы), где критически важна гранулярность обновлений [4].

Для демонстрации различий в подходах (Flux против Atomic) рассмотрим реализацию одной задачи: хранение профиля пользователя и обновление его имени.

1. RTK. Централизованный, строгий подход, основан на действиях и редьюсерах. Требуется соблюдения строгой архитектуры (Slice, Dispatch, Selector), что обеспечивает унификацию кода в больших командах.

```
const userSlice = createSlice({
  name: 'user',
  initialState: { name: 'Anonymous', age: 0 },
  reducers: {
    updateName: (state, action) => {
      state.name = action.payload; // Мутация через Immer
    },
  },
});

const UserComponent = () => {
  const name = useSelector((state) => state.user.name);
  const dispatch = useDispatch();
  return <input value={name} onChange={(e) =>
    dispatch(updateName(e.target.value))} />;
};
```

**Рисунок 1 – Пример использования RTK**

2. Zustand. Децентрализованный, ориентированный на хуки. Минимальный объем кода. Логика обновления инкапсулирована вместе с данными.

```
const useUserStore = create((set) => ({
  user: { name: 'Anonymous', age: 0 },
  updateName: (name) => set((state) => ({
    user: { ...state.user, name }
  })),
}));

// 2. Использование
const UserComponent = () => {
  const { user, updateName } = useUserStore();
  return <input value={user.name} onChange={(e) =>
    updateName(e.target.value)} />;
};
```

**Рисунок 2 – Пример использования Zustand**

3. Recoil. Атомарный, распределенный подход. API схож с useState. Обеспечивает максимальную производительность рендеринга при масштабировании количества полей состояния.

```
export const userNameState = atom({
  key: 'userNameState',
  default: 'Anonymous',
});

// 2. Использование
const UserComponent = () => {
  const [name, setName] = useRecoilState(userNameState);
  return <input value={name} onChange={ (e) =>
    setName(e.target.value)} />;
};
```

### Рисунок 3 – Пример использования Recoil

Таким образом, выбор инструмента управления состоянием должен быть продиктован спецификой конкретных задач: для работы с серверными данными стандартом является TanStack Query, в то время как для реализации глобальной логики в обычных приложениях оптимально подходит Zustand, а в крупных Enterprise-системах – Redux Toolkit.

В то же время Context API остается лучшим решением для простых задач вроде темизации, тогда как высокоинтерактивные интерфейсы со сложными зависимостями, такие как дашборды или редакторы, требуют использования атомарных библиотек Recoil, минимизирующих лишние рендеры за счет своей архитектуры.

### ЛИТЕРАТУРА

1. React / Optimizing Performance [Электронный ресурс]. – URL: <https://legacy.reactjs.org/docs/optimizing-performance.html>. – Дата доступа: 03.02.2026.

2. Redux Toolkit / Usage Guide: Why RTK is Redux Today [Электронный ресурс]. – URL: <https://redux-toolkit.js.org/usage/usage-guide>. – Дата доступа: 03.02.2026.

3. React / Performance Testing with the Profiler [Электронный ресурс]. – URL: <https://react.dev/reference/react/Profiler>. – Дата доступа: 03.02.2026.

4. Meta Engineering / Recoil: State Management for Complex Interfaces [Электронный ресурс]. – URL: <https://engineering.fb.com/2020/05/14/video/recoil-state-management-for-react/>. – Дата доступа: 03.02.2026.

## АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПОЛИНОМОВ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ

Идентификация штриховых изображений относится к задачам анализа структурированных графических объектов, характеризующихся регулярной штриховой структурой, высокочастотной топологией и наличием малых геометрических искажений. Прямое сравнение пиксельных представлений чувствительно к повороту, масштабированию, изменению яркости и локальным дефектам, что снижает надёжность идентификации. В связи с этим формирование признакового описания целесообразно осуществлять на основе разложения изображения по ортогональному полиномиальному базису [1], обеспечивающему компактное и устойчивое представление структуры.

В общем виде изображение рассматривается как дискретная функция интенсивности  $f(x, y)$ , заданная на конечной области опре-

деления, и аппроксимируется конечным рядом:

$$f(x, y) \approx \sum_{p=0}^N \sum_{q=0}^{N-p} M_{pq} \phi_{pq}(x, y),$$

где  $\phi_{pq}(x, y)$  – базисные функции выбранного полиномиального семейства;  $M_{pq}$  – коэффициенты разложения (моменты);  $N$  – максимальный порядок разложения.

Совокупность коэффициентов  $\{M_{pq}\}$  формирует вектор признаков, используемый при идентификации. Свойства алгоритма определяются ортогональностью базиса, его инвариантными характеристиками и численной устойчивостью при увеличении порядка.

Классическим вариантом являются геометрические моменты

$$m_{pq} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x, y).$$

Они описывают распределение интенсивности относительно начала координат. Для устранения зависимости от переноса вычисляется центр масс:

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \quad \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}}$$

после чего вводятся центральные моменты:

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y).$$

Центрирование координат обеспечивает инвариантность к сдвигу [1]. Однако степенной базис не является ортогональным, что приводит к корреляции коэффициентов и росту вычислительных погрешностей при больших порядках. Это ограничивает применение геометрических моментов при анализе тонких штриховых структур и малых деформаций.

Устранение указанных недостатков достигается использованием ортогональных полиномиальных систем. Одним из наиболее распространенных непрерывных семейств являются моменты Цернике, определяемые на единичном  $x^2 + y^2 \leq 1$  [1]:

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{nm}^*(x, y),$$

где базисная функция в полярных координатах имеет вид:

$$V_{nm}(r, \theta) = R_{nm}(r) e^{jm\theta}.$$

Ортогональность функций  $V_{nm}$  обеспечивает взаимную независимость коэффициентов  $Z_{nm}$ . Абсолютные значения  $|Z_{nm}|$  не зависят от угла поворота изображения, что позволяет использовать их в качестве вращательно-инвариантных признаков. Повышение порядка  $n$  увеличивает чувствительность к мелким элементам контура и штриховой структуры. Применение ускоренных алгоритмов вычисления, основанных на преобразованиях Фурье и параллельной обработке [2], делает возможным использование высоких порядков в практических системах.

Развитием данного подхода являются псевдо-Цернике моменты [3]:

$$PZ_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint f(x, y) R_{nm}(r) e^{-jm\theta} dx dy.$$

Модификация радиального полинома позволяет получить больше независимых коэффициентов при фиксированном максимальном порядке. Это расширяет информативность признакового пространства и повышает устойчивость к шумовым искажениям и геометрическим отклонениям, обусловленным технологическими факторами формирования и цифровой регистрации защитных элементов.

Для изображений, заданных в прямоугольной области, применяются моменты Лежандра:

$$L_{pq} = \frac{(2p+1)(2q+1)}{4} \sum_x \sum_y P_p(x) P_q(y) f(x, y),$$

где полиномы Лежандра удовлетворяют рекуррентному соотношению:

$$P_{n+1}(x) = \frac{2n+1}{n+1}xP_n(x) - \frac{n}{n+1}P_{n-1}(x).$$

Ортогональность на интервале  $[-1, 1]$  уменьшает взаимную зависимость коэффициентов, а нормализация координат обеспечивает инвариантность к масштабу и переносу.

При анализе изображений, представленных в цифровой форме, целесообразно использование дискретных ортогональных моментов, поскольку они формулируются непосредственно на конечной сетке и не требуют аппроксимации интегралов [4]. Это обеспечивает согласованность математической модели с дискретной природой данных и уменьшает накопление вычислительных ошибок.

Моменты Чебышёва определяются выражением:

$$T_{pq} = \sum_x \sum_y t_p(x)t_q(y)f(x,y),$$

где  $t_p(x)$  – дискретные ортогональные полиномы Чебышёва [1].

Выполнение вычислений полностью в дискретной области повышает численную устойчивость при больших порядках разложения.

К данному классу относятся также моменты Кравчука:

$$K_{pq} = \sum_x \sum_y K_p(x; p, N)K_q(y; p, N)f(x, y).$$

Параметр  $p$  задаёт форму весового распределения и определяет пространственную локализацию анализа. Возможность регулирования этого параметра позволяет акцентировать внимание на заданных участках изображения и эффективно выявлять локальные дефекты штриховой структуры.

**Сравнительная таблица методов:**

Метод	Базис	Инвариантность	Численная устойчивость	Применение
Геометрические и центральные моменты	Степенные функции	Перенос	Низкая	Базовое распознавание
Zernike Moments	Ортогональные полиномы на круге	Поворот	Средняя	Контурный анализ
Pseudo-Zernike Moments	Модифицированные ортогональные полиномы	Поворот	Повышенная	Защитные и графические структуры
Legendre Moments	Ортогональные полиномы прямоугольной области	После нормализации	Средняя	Общая форма

Метод	Базис	Инвариантность	Численная устойчивость	Применение
Tchebichef Moments	Дискретные ортогональные полиномы	После нормализации	Высокая	Цифровая обработка
Krawtchouk Moments	Дискретные ортогональные полиномы	После нормализации	Средняя	Локальные признаки

Сопоставление различных семейств моментов показывает, что переход от степенного базиса к ортогональным полиномиальным системам уменьшает корреляцию коэффициентов и повышает устойчивость вычислений.

Непрерывные семейства (Цернике, псевдо-Цернике) естественным образом обеспечивают вращательную инвариантность и эффективны при анализе глобальных контурных характеристик.

Дискретные семейства (Чебышёва, Кравчука) характеризуются высокой численной стабильностью при цифровой реализации и позволяют учитывать локальные особенности изображения без перехода к непрерывной аппроксимации.

Использование полиномов высоких порядков позволяет формировать информативные и устойчивые признаки штриховых защитных изображений. На этой основе реализуются эффективные методы и алгоритмы их распознавания и выявления дефектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Qi S., Zhang Y., Wang C., Zhou J., Cao X. A Survey of Orthogonal Moments for Image Representation: Theory, Implementation, and Evaluation // arXiv preprint arXiv:2103.14799. – 2021. – 43 p.
2. Al-Rawi M. Ultra-Fast Zernike Moments using FFT and GPU // arXiv preprint arXiv:2304.14492. – 2023. – 17 p.
3. Gishkori S., Mulgrew B. Pseudo-Zernike Moments Based Sparse Representations for SAR Image Classification // arXiv preprint arXiv:1710.09175. – 2017. – 8 p.
4. Di Ruberto C., Loddo A., Putzu L. Fast and Accurate Computation of Orthogonal Moments for Image Representation // arXiv preprint arXiv:1803.00638. – 2018. – 21 p.

## МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ СУДОВ

Как отмечено в работах [1, 2], в настоящее время все большее распространение получает использование аппаратно - программных комплексов для испытаний радиолокационных систем различного назначения. В связи с этим важное значение приобретает разработка математических моделей сигналов, имеющих место для тех или иных условий функционирования радиолокационной системы, и алгоритмов для их реализации на ЭВМ. В частности, одной из задач, возникающей при моделировании радиолокационных сигналов, является задача построения математической модели сигнала, отраженного от подстилающей поверхности. В качестве такой поверхности может выступать поверхность суши или моря. На некотором этапе построения данной модели возникает задача расчета мощности сигнала, отраженного от некоторого элементарного участка поверхности. При этом особенностью модели для морской поверхности является то, что в диаграмму направленности антенны (ДНА) РЛС могут попадать крупногабаритные суда, которые будут создавать участки морской поверхности, недоступные для электромагнитной волны, излученной антенной РЛС, – участки тени. Это в свою очередь приведет к уменьшению мощности отраженного от поверхности сигнала, что должно быть учтено при построении модели.

Как показано в [1, 2], модель входного сигнала антенны РЛС, отраженного от подстилающей поверхности, может быть представлена как сумма сигналов, отраженных от некоторого числа элементарных участков, составляющих эту поверхность:

$$s(t) = e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} \sum_{i=0}^{N-1} A_i(t) U(t - \tau_E^i), \quad (1)$$

где

$$D_i = M[|A_i(t)|^2] = \frac{H_A^2 P_0 S_A G_{APi}}{16\pi^2 r_i^6} r_i \Delta \Theta_\beta \Delta r \alpha_0^S = \frac{H_A^2 P_0 S_A G_{APi}}{16\pi^2 r_i^6} \Delta S_i \alpha_0^S \quad (2)$$

мощность сигнала, отраженного от  $i$ -го участка поверхности;  $\Delta S_i = r_i \Delta \Theta_\beta \Delta r$  – площадь  $i$ -го участка поверхности;  $\omega_0$  – частота зондирующего сигнала РЛС;  $\varphi_0$  – начальная фаза зондирующего сигнала

РЛС;  $A_i(t)$  – амплитуда сигнала, отраженного от  $i$ -го участка поверхности  $U(t)$  – закон модуляции зондирующего сигнала;  $\tau_E^i$  – задержка сигнала на входе антенны РЛС при отражении от  $i$ -го участка поверхности по отношению к моменту посылки зондирующего импульса,

$$r_i = R_{\min} + \frac{\Delta r}{2} + i\Delta r - \quad (3)$$

горизонтальная дальность до центра  $i$ -го участка поверхности;  $\Delta r$  – протяженность элементарного участка поверхности по радиальной дальности;  $P_0$  – мощность зондирующего сигнала;  $H_A$  – высота антенны;  $S_A$  – эффективная площадь раскрытия приемной антенны;  $G_A$  – коэффициент усиления антенны РЛС;  $p_i$  – коэффициент (случайное число из  $[0, 1]$ ), статистически моделирующий колебания значения площади видимой части (со стороны антенны РЛС)  $i$ -го участка поверхности в результате волнение моря;  $\alpha_0^S$  – среднее значение удельной эффективной площади рассеивания (ЭПР) элемента морской поверхности.

Пусть  $L_{sh}$  – длина надводного судна,  $D_{sh}$  – ширина надводного судна,  $H_{sh}$  – средняя высота надводного судна,  $\beta_{sh}^L$  – азимут продольной оси судна (может совпадать с азимутом скорости судна при его движении),  $\vec{e}_{sh}^\beta$  – единичный вектор вдоль направления азимута судна  $\beta_{sh}$  (азимута центра масс),  $\vec{e}_{sh}^L$  – единичный вектор, направленный вдоль продольной оси судна. Будем рассматривать судно как параллелепипед длиной  $L_{sh}$ , шириной  $D_{sh}$  и высотой  $H_{sh}$ , ориентированный относительно своего азимута под углом  $\Delta\beta_{sh}$ , где  $\Delta\beta_{sh}$  – угол между векторами  $\vec{e}_{sh}^\beta$  и  $\vec{e}_{sh}^L$  (Рис.1),  $\Delta\beta_{sh} = \beta_{sh}^L - \beta_{sh}$ .

Очевидно, что степень затенения водной поверхности судном будет зависеть от его ориентации относительно РЛС и определяться длиной отрезка  $AB = L_{sh}^\perp$  – размер судна, видимый со стороны антенны РЛС (рис.1).

$$L_{sh}^\perp = L_{sh} \left| \sin(\beta_{sh}^L - \beta_{sh}) \right| + D_{sh} \left| \cos(\beta_{sh}^L - \beta_{sh}) \right| \quad (4)$$

Пусть  $R_{sh}$  – горизонтальная дальность до судна.

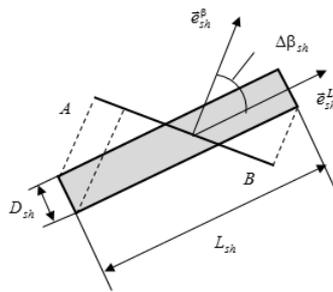


Рисунок 1 – Условное изображения морского судна

Тогда

$$\delta\beta_{sh} = 2\arctg \frac{L_{sh}^{\perp}}{2R_{sh}} - \quad (5)$$

угловой размер судна. Если оказывается, что  $\delta\beta_{sh} \ll \Delta\Theta_{\beta}$ , где  $\Delta\Theta_{\beta}$  – ширина ДНА антенны РЛС по азимуту, то рассматривать затенение не имеет смысла. В противном случае вычислим длину  $\Delta R_{sh}$  затенённого участка морской поверхности.

Составим пропорцию (рис.2):

$$\frac{\Delta R_{sh}}{R_{sh} + \Delta R_{sh}} = \frac{H_{sh}}{H_A} \quad (6)$$

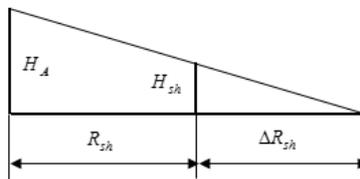


Рис. 2. Схема для расчета протяженности области затенения

Из (6) получаем выражение для определения протяженности зоны затенения

$$\Delta R_{sh} = \frac{R_{sh}}{H_A/H_{sh} - 1}. \quad (7)$$

Полученное выражение имеет смысл при  $H_A > H_{sh}$ . При этом область тени определяется фигурой BCDE (рис. 3). При  $H_A \leq H_{sh}$  будем полагать, что

$$\Delta R_{sh} = R_{\max} - R_{sh} \quad (8)$$

где  $R_{\max}$  – максимальная дальность, с которой с которой собирается отраженный от морской поверхности сигнал. В этом случае область затенения будет определяется фигурой BCD'E' (рис. 3).

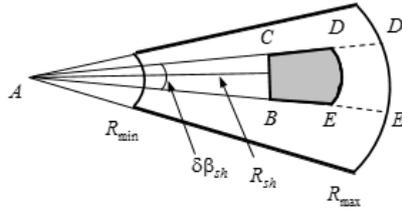


Рисунок 3 – Схема для вычисления площади тени

Вычислим площадь поверхности, с которой собирается отраженный от морской поверхности сигнал в отсутствии надводного судна.

$$\Delta S = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_0^{\Delta\Theta_\beta} r dr d\beta = \left( R_{\min} + \frac{\Delta R}{2} \right) \Delta R \Delta\Theta_\beta, \quad (9)$$

где  $R_{\min}$  – минимальная дальность, с которой с которой собирается отраженный от морской поверхности сигнал,  $\Delta R = R_{\max} - R_{\min}$ .

Вычислим теперь площадь поверхности затененной надводным судном.

$$\Delta S_{sh} = \int_{R_{sh}}^{R_{sh} + \Delta R_{sh}} \int_0^{\delta\beta_{sh}} r dr d\beta = \left( R_{sh} + \frac{\Delta R_{sh}}{2} \right) \Delta R_{sh} \delta\beta_{sh}. \quad (10)$$

Определим площадь морской поверхности, формирующей отраженный сигнал, при наличии затенения части поверхности надводным судном.

$$\Delta S_x = \Delta S - \Delta S_{sh} = \Delta S(1 - ks), \quad (11)$$

где  $ks = \frac{\Delta S_{sh}}{\Delta S} = \frac{\left( R_{sh} + \frac{\Delta R_{sh}}{2} \right) \Delta R_{sh} \delta\beta_{sh}}{\left( R_{\min} + \frac{\Delta R}{2} \right) \Delta R \Delta\beta}$  – коэффициент затенения.

затенения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дятко А.А., Костромицкий С.М., Шумский П.Н. Математическая модель сигнала, отраженного от земной поверхности, при сопровождении РЛС низколетящей цели // Доклады БГУИР. 2015. №8(94). С. 17 – 23.

2. Дятко А.А., Костромицкий С.М., Шумский П.Н. Математическая модель радиолокационного сигнала, отраженного от земной поверхности // Труды БГТУ. 2012. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 127 – 130.

## **ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ИНТЕРЬЕРОВ И МЕБЕЛИ**

Искусственный интеллект (ИИ) – тип машинного обучения, программа, у которой есть способность к обучению, как у человеческого мозга. Истоки создания ИИ уходят в 40-е года XX века. Первая нейросеть, которая могла обучаться, была создана в 1957 году и продолжила совершенствоваться до 80-х годов. После чего интерес к ней практически исчез. В последнее время ИИ приобрел невероятное развитие и широкое применение во всех областях жизни человека. Изначально он планировался для решения простых задач (переводы текстов, распознавание изображений и т.д.), но уже применяется для решения сложных инженерных и технологических задач. Исключением не стала и область проектирования интерьеров и мебели [1], где создаются специализированные сервисы, позволяющие решить ряд задач оптимизации и взаимодействия с пользователем.

По большей части ИИ используется дизайнерами и проектировщиками на начальной стадии разработки в момент обобщения пожеланий заказчика и внешнего вида интерьера (Midjourney, DALL-E, Stable Diffusion). Сформированные на основе текстового описания модели позволяют определить концепцию, цветовые и интерьерные решения, что дает возможность достаточно быстро преодолеть так называемый «синдром чистого листа» на этапе проектирования [2] и тем самым привлечь заказчика. Кроме того, ИИ помогает провести достаточно быструю визуализацию проекта на основе простых 3d-моделей. Искусственный интеллект, за счет постоянного обучения, позволяет усовершенствовать качество проекта и оперативно реагировать на вносимые изменения. Также ИИ автоматизирует ряд рутинных процессов (стилистическое оформление, сценарий освещения и т.д.), что в общем итоге освобождает дизайнера для более творческой работы. Однако в этом случае есть и ряд особенностей: результат в высокой степени зависит от корректности сформированного запроса, необходим авторский контроль, а также возможность материальной реализации сгенерированных моделей.

Использование математических моделей и алгоритмов ИИ позволяет избежать ряда ошибок, например в вопросах эргономики с учетом антропометрических данных конкретного человека.

Заметную роль в минимизации ошибок играют BIM-системы, интегрированные с ИИ [3]. В этом случае их можно использовать для учета требований нормативно-технической документации: ГОСТ, СНиП, СП, и т.д.

ИИ за счет использования интеллектуальных алгоритмов машинного обучения позволяет значительно сократить временные трудозатраты. Анализу подлежат различные аспекты проектирования: мировые тренды развития дизайна, технические и технологические способы реализации проектов, свойства, используемых материалов, цветовые особенности, и самое главное, сотни готовых проектов. На реализацию данных решений у человека ушло бы несколько дней, а может и неделю. В зависимости от поставленной задачи проектировщик может использовать различное программное обеспечение (таблица [4, 5]).

#### Технологии на основе искусственного интеллекта

Технология	Применение	Компании/ПО
Генеративный дизайн	Автоматическая генерация планировок	Kandinsky, ReRoom AI, Homestyler, AI Home Design, AI SpaceMaker, TestFit, Interior AI, DALL-E PicLumen, KREA.AI, Maket AI, Foyr Neo Collov AI, Midjourney, Stable Diffusion
Компьютерное зрение	Анализ помещений через фото/видео	RoomGPT, Planner 5D, MagicPlan
NLP (чат-боты)	Общение с клиентами для сбора предпочтений	DecorMatters, Houzz
AR/VR+ ИИ	Интерактивная «примерка» мебели в реальном времени IKEA Place, Amazon Room Decorator, Hailuo AI, R	IKEA Place, Amazon Room Decorator, Hailuo AI, Runway, REImagine Home, AI Home Design, ReRoom AI

Использование ИИ конечно же значительно облегчает работу дизайнера, но на сегодняшний день он остается всего лишь инструментом. В этом случае ограничения связаны с тем, что нейросети не обладают абстрактным мышлением, не всегда учитывают культурные особенности, так как они всего лишь обрабатывают полученные данные. В этом случае происходит трансформация роли проектировщика, основной задачей которого становится промпт-инжиниринг [5], т.е. умение правильно формировать запросы к нейросетям, которые должны максимально точно передают проектный замысел. Второй задачей становится критический анализ полученного проектного решения, который включает выявление жизнеспособных проектов. И тре-

твей задачей является дальнейшая интеграция разнородных инструментов для реализации материального результата проекта [6].

В результате проведенного анализа можно сказать, что ИИ становится неотъемлемой частью области дизайн проектирования мебели и интерьеров, начиная с творческого замысла и заканчивая реализацией проекта в материале. Дальнейшее развитие будет направлено на более глубокую интеграцию различных технологий и создание гибридных интеллектуальных систем, где человеку отводится роль творчества, а машина выполняет технические и технологические расчеты и задачи. При этом следует не забывать о ряде проблем, которые могут возникнуть. С помощью ИИ на основе комбинаторики создаются проекты, которые достаточно сложно назвать аутентичными в отличие от работ дизайнера, который обладает определенным стилем работы. Немаловажным этическим аспектом также является установление авторского права, что требует внедрение этических норм в процесс обучения нейросетей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Воробей А.В., Шумилова А.В., Палушкина С.А. Нейросети в архитектуре и учебном процессе. Перспективы развития и практическое применение // Наука, личность, образование в эпоху перемен: сборник статей Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 11 сент. 2023 г. – Петрозаводск: Новая наука, 2023. – С. 125–130.
2. Ардуанов, А. Применение искусственного интеллекта в процессах разработки дизайн-проектов интерьера // Вестник науки. 2025. № 12 (93). Т. 3. С. 2083–2088.
3. Смит, Дж. Искусственный интеллект в дизайне интерьера: современные тенденции и перспективы на будущее // Журнал дизайна и технологий. 2022. – Т. 15. – С. 45–60.
4. Комаренко А.Р., Кучеренко М.С. Искусственный интеллект в дизайне интерьера // Дизайн и архитектура: синтез теории и практики: сборник научных трудов: сборник научных трудов IX Международной научно-практической конференции, Краснодар, 15–17 апр. 2025 г. – Краснодар, 2025. С. 184-191.
5. Мартынова А.В. AR/VR технологии в современном дизайне интерьера // Наука, творчество, инновации. – 2022. – №4. – С. 20–28.
6. Wang C., Zhong H., Chai M., He M., Chen D., Liao J. Chat2Layout: Interactive 3D Furniture Layout with a Multimodal LLM // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2025. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11222970> (дата обращения: 10.01.2026).

## **DEVELOPING A SECURE WEB APPLICATION FOR ANALYZES DATA LEAKS VIA EMAIL**

### **Introduction**

Email remains one of the most widely used communication tools in both personal and professional environments. However, its popularity makes it a prime target for cybercriminals and a frequent source of accidental data leaks. According to recent cybersecurity reports, a significant percentage of security breaches originate from compromised email accounts or phishing attacks.

Data leaks through email can occur due to weak authentication mechanisms, malware infections, social engineering attacks, or user negligence. Such incidents can lead to financial losses, reputational damage, and legal consequences. Therefore, developing a secure system that can analyze email traffic and detect potential data leaks is of critical importance.

This paper proposes a secure web application designed to monitor and analyze emails for potential data leakage. The system focuses on real-time detection, risk assessment, and preventive actions to enhance organizational security.

### **Related Work**

Previous research has explored various approaches to email security, including spam filtering, phishing detection, and data loss prevention (DLP) systems. Traditional DLP solutions rely on predefined rules and pattern matching to identify sensitive information. While effective to some extent, rule-based systems often generate false positives and fail to detect new attack patterns.

Recent studies emphasize the use of machine learning algorithms for anomaly detection and content classification. Natural Language Processing (NLP) techniques have been applied to analyze email content and identify sensitive data. However, many existing solutions lack a comprehensive web-based interface and robust security architecture.

The proposed system builds upon existing research by integrating machine learning with secure web technologies to provide an efficient and user-friendly platform for data leak analysis.

### **System Architecture**

The web application follows a modular architecture consisting of the following components:

1. User Interface (UI) – Provides a dashboard for administrators to monitor email traffic, view alerts, and generate reports.

2. Authentication Module – Implements multi-factor authentication and role-based access control to prevent unauthorized access.

3. Email Processing Engine – Extracts metadata and content from incoming and outgoing emails.

4. Data Analysis Module – Uses machine learning algorithms to classify emails based on risk level.

5. Security Layer – Applies encryption, secure APIs, and intrusion detection mechanisms.

6. Database – Stores encrypted logs, user data, and analysis results.

The system is hosted on a secure cloud infrastructure to ensure scalability and availability.

### **Methodology**

#### **1. Data Collection**

Email data is collected through secure APIs or mail server integration. The system processes subject lines, message bodies, and attachments while complying with privacy regulations such as GDPR.

#### **2. Feature Extraction**

Key features include keyword frequency, file types, sender behavior, and anomaly patterns. NLP techniques are used to identify sensitive entities such as credit card numbers, personal identifiers, and confidential documents.

#### **3. Machine Learning Model**

A supervised learning model is trained using labeled email datasets. Algorithms such as Support Vector Machines (SVM), Random Forest, and Neural Networks are evaluated. The model classifies emails into categories: safe, suspicious, and critical.

#### **4. Security Implementation**

All data transmissions are encrypted using TLS protocols. Sensitive data stored in the database is protected with AES-256 encryption. Regular security audits and penetration testing are conducted.

### **Implementation**

The application is developed using modern web technologies such as React for the frontend and Node.js for the backend. A RESTful API enables communication between system components. The machine learning model is deployed using Python and integrated via microservices.

Docker containers are used to ensure environment consistency, and continuous integration pipelines are implemented to maintain code quality.

### **Evaluation**

The system is tested using real-world and synthetic datasets. Performance metrics include accuracy, precision, recall, and F1-score. Experimental results show an average detection accuracy of 92%, demonstrating high reliability in identifying data leaks.

User feedback indicates that the dashboard is intuitive and provides actionable insights for security teams.

### **Discussion**

The proposed system effectively combines security best practices with intelligent data analysis. Unlike traditional DLP tools, the machine learning-based approach adapts to evolving threats. However, challenges remain in handling encrypted email content and minimizing false positives.

Future improvements may include deep learning models, real-time alert systems, and integration with enterprise security platforms.

### **Conclusion**

This study presents a secure web application for analyzing data leaks via email. By integrating machine learning, encryption, and modern web technologies, the system offers a robust solution for detecting and preventing unauthorized data exposure. The results confirm its effectiveness and potential for real-world deployment.

As cyber threats continue to evolve, such intelligent and secure platforms will play a crucial role in protecting digital communication channels.

### **REFERENCES**

1. Behl, A., & Behl, K. (2017). *Cyberwar: The Gray Zone Between War and Peace*. Oxford University Press.
2. Chandrasekaran, M., et al. (2006). *Phishing email detection based on structural properties*. NYU Technical Report.
3. Sommer, R., & Paxson, V. (2010). *Outside the closed world: On using machine learning for network intrusion detection*. IEEE Symposium on Security and Privacy.
4. European Union. (2018). *General Data Protection Regulation (GDPR)*.

УДК 51-3

Т.А. Котенева, ст. преп.  
(Губкинский филиал БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Губкин, Россия)

### **ОТ ЗАДАЧИ О КВАДРАТУРЕ КРУГА К СОВРЕМЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Относительная простота вычисления площади квадрата привела к попыткам решить общую задачу о квадратуре других фигур. Квадратура фигуры – это построение квадрата с той же площадью, что и у данной фигуры, с помощью только циркуля и линейки. Если бы можно было построить такие квадраты, то это дало бы нам ценный

графический инструмент, позволяющий решить важную задачу вычисления площадей.

При данном линейном размере  $L$  было бы сразу возможно вычислить площадь поверхности  $L^2$ , потому что эта площадь была бы равна площади квадрата со стороной  $L$ . Теорема Пифагора помогает при решении задач о квадратуре фигур.

Сначала мы рассмотрим, как решить задачу о квадратуре треугольника. Возьмем прямоугольный треугольник с катетами  $b$ ,  $c$  и гипотенузой  $a$ . Как показано на рисунке, продолжим отрезок  $c$  на расстояние  $b$  и обозначим точкой  $M$  середину отрезка  $c+b$ .

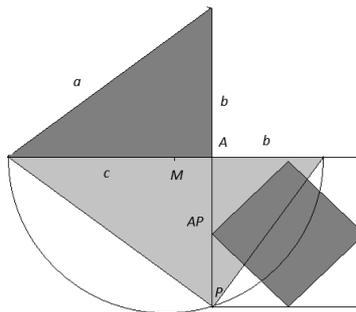


Рисунок 1 – Квадратура треугольника

Затем проведем окружность с центром в точке  $M$  и радиусом  $\frac{b+c}{2}$ . Теперь продолжим катет  $b$  от точки  $A$  до точки  $P$  на окружности. Отрезок  $AP$  будет высотой прямоугольного треугольника с гипотенузой  $b+c$ , и по теореме о высоте  $AP = \sqrt{bc}$ .

Таким образом, квадрат со стороной  $\sqrt{bc}$  будет иметь площадь  $bc$ , а другой квадрат, с вершинами в серединах его сторон (темно-серый на рисунке), будет иметь площадь в два раза меньше,  $bc/2$ , то есть площадь, равную площади исходного треугольника. Таким образом можно решить задачу о квадратуре любого прямоугольного треугольника.

Рассмотрим теперь эту задачу для любого многоугольника, например, шестиугольника. Любой многоугольник всегда можно разбить на треугольники, и затем каждый из этих треугольников всегда можно разделить на два прямоугольных треугольника. Таким образом, всегда можно вычислить площадь любого многоугольника, сведя задачу к квадратуре входящих в его состав прямоугольных треугольников.

Разделив шестиугольник на прямоугольные треугольники, мы получим в результате ряд квадратов, сумма площадей которых равна площади исходной фигуры. Теперь можно использовать их, чтобы решить задачу о квадратуре многоугольника. Из маленьких квадратов

мы построим один большой квадрат, площадь которого равна сумме их площадей.

Однако для одной фигуры этот метод не работает. Это выяснилось, когда встал следующий логичный вопрос: как найти квадратуру круга? Многие ученые потратили на достижение этой химерной цели всю жизнь, что в сумме составляет нескольких столетий. В алхимии такой несбыточной мечтой было превращение неблагородных металлов в золото, а в математике подобной задачей является квадратура круга. Невозможность решения связана с тем, что круг нельзя разделить на треугольники. Можно попытаться превратить круг в многоугольник с большим количеством крошечных сторон, а затем посчитать сумму их площадей, но это дает лишь приближенное значение. Эту задачу невозможно решить с помощью циркуля и линейки. Сегодня выражение «квадратура круга» используется, когда упоминают различные невыполнимые задачи, решать которые не имеет смысла.

В 1837 году Пьер Ванцель доказал, что с помощью циркуля и линейки можно построить только те отрезки, длины которых выражаются через квадратные корни из рациональных чисел. А в 1882 году Фердинанд фон Линдеман доказал трансцендентность числа  $\pi$ . Поскольку построение квадрата, равновеликого кругу единичного радиуса, требует построения отрезка длины  $\sqrt{\pi}$ , а  $\sqrt{\pi}$  – трансцендентное число, задача неразрешима в классической постановке.

Это доказательство стало триумфом математической мысли и образцом завершенности решения. Однако, вопреки распространенному мнению, это не "конец истории", а начало новых направлений исследований.

Проблема квадратуры круга стимулировала развитие алгоритмов приближенного вычисления  $\pi$  с высокой точностью и исследование нормальности числа  $\pi$  – является ли оно "случайным" в смысле распределения цифр? Одно из современных достижений – вычисление  $\pi$  с точностью до  $10^{15}$  знаков (2024 год).

Фундаментальный метод Архимеда – аппроксимация площади круга площадями вписанных и описанных многоугольников – является первым в истории алгоритмом контролируемой аппроксимации континуума дискретным набором примитивов. В цифровую эпоху эта проблема проявляется как задача растеризации: отображения идеальной геометрической фигуры на дискретную растровую сетку пикселей.

Алгоритм Брезенхема (1962) для генерации окружности – это прямое вычислительное воплощение этого принципа. Он не строит «идеальную» окружность, но определяет оптимальную последова-

тельность пикселей, минимизируя среднеквадратичное отклонение от математической кривой.

Таким образом, проблема квадратуры трансформируется в задачу эффективной дискретизации с эстетически приемлемой погрешностью.

Если задача квадратуры требовала сведения кривой к примитиву (квадрату), то современное компьютерное проектирование решает обратную, но методологически родственную задачу: как максимально точно и гибко описать произвольную кривую или поверхность, используя конечный набор параметров. Ответом стали NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines).

NURBS можно рассматривать как мощное обобщение идеи аппроксимации. Вместо аппроксимации одной фигуры другой используются базисные сплайновые функции, порождающие целое семейство кривых. Контрольные точки и весовые коэффициенты в NURBS играют роль, аналогичную вершинам аппроксимирующего многоугольника у Архимеда, но с принципиально иным уровнем контроля.

Задача о квадратуре круга не утратила актуальности, а претерпела фундаментальную методологическую реинкарнацию. Изолированная геометрическая проблема превратилась в универсальный прототип для подхода, лежащего в основе цифровых технологий: представления и анализа непрерывных объектов через их дискретную, приближённую, но контролируемо точную аппроксимацию.

Исторический путь от поиска точного построения к разработке оптимальных алгоритмов приближения отражает более общую тенденцию в современной науке: смещение фокуса с экзистенциальных вопросов к вопросам оптимальности и эффективности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учебник. – 8-е изд. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 636 с.
2. Брезенхем Дж. Алгоритм для генерации окружностей на растровых дисплеях // Алгоритмическая графика / Под ред. С.М. Гершгорина. – М.: Мир, 1989. – С. 34-39
3. Пьегль Л., Тиллер У. Практическое руководство по NURBS-моделированию. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 432 с.
4. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

**СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИМУЛЯЦИИ  
АЛГОРИТМА ГРОВЕРА И КЛАССИЧЕСКИХ  
АЛГОРИТМОВ ПОИСКА**

В недавних исследованиях [1] было показано, что классические симуляторы квантовых вычислений при моделировании алгоритма Гровера [2] требуют до 16 ГБ оперативной памяти уже при 30 кубитах, что ставит под сомнение практическую применимость теоретического квадратичного ускорения поиска на классическом оборудовании. Этот факт подчёркивает разрыв между асимптотическими оценками квантовых алгоритмов и их реальной вычислительной стоимостью при классической симуляции.

Актуальность данной работы обусловлена активным использованием классических симуляторов в исследованиях квантовых алгоритмов на фоне отсутствия масштабируемых квантовых процессоров. Несмотря на обширную теоретическую базу алгоритма Гровера, современные исследования [3] указывают на экспоненциальные ограничения симуляции, которые могут нивелировать ожидаемое преимущество по сравнению с классическими алгоритмами поиска.

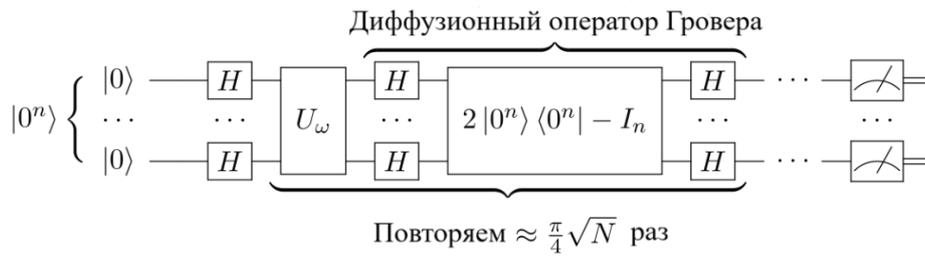
Цель работы – провести экспериментальное сопоставление вычислительных затрат при реализации алгоритма Гровера на классическом симуляторе на языке Q# и классического алгоритма поиска на языке C++.

Для корректного сравнения квантового и классического алгоритма поиска будем использовать одинаковое число элементов в неупорядоченной базе данных  $N = 2^n$ , где  $n$  варьируется от 10 до 25. Каждая конфигурация будет включать один элемент, который необходимо будет найти с использованием алгоритма Гровера и классического алгоритма поиска.

Схема алгоритма Гровера представлена на рис. 1. При реализации алгоритма Гровера будем задавать следующее число итераций [4]:

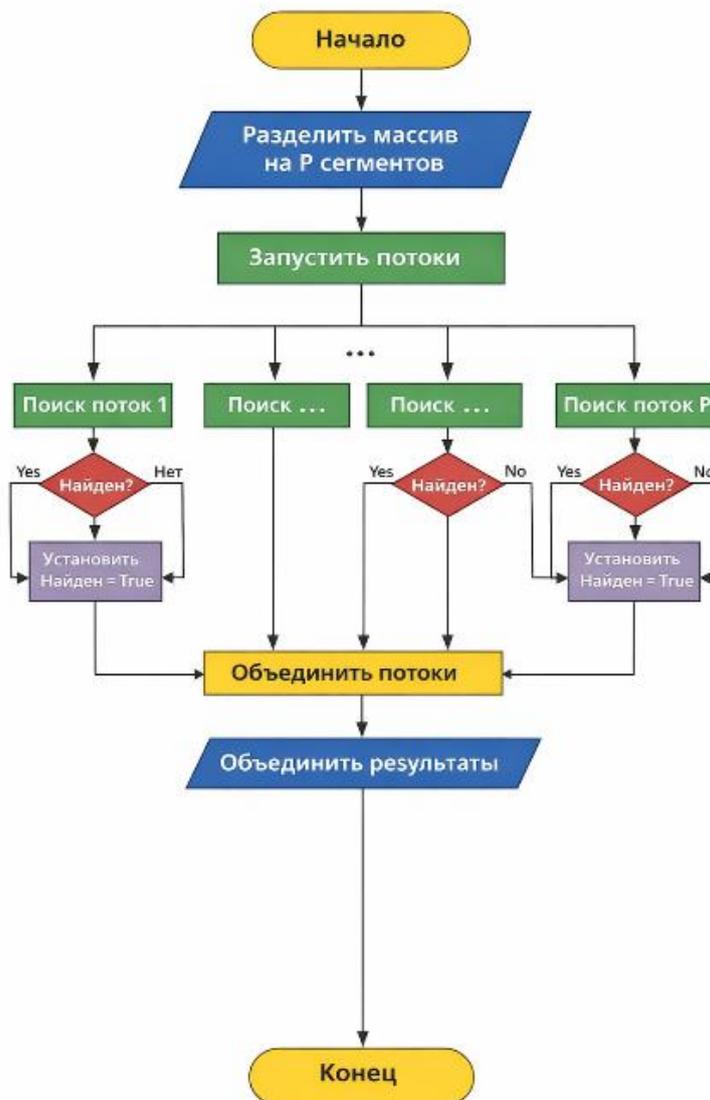
$$N_{opt} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{N}{M}}, \quad (1)$$

где  $N_{opt}$  – оптимальное число итераций,  $N = 2^n$  – число элементов в неупорядоченной базе данных,  $M$  – количество решений задачи поиска.



**Рисунок 1 – Схема алгоритма Гровера**

В качестве классического алгоритма поиска был выбран алгоритм параллельного поиска [5]. Блок-схема данного алгоритма представлена на рис. 2.



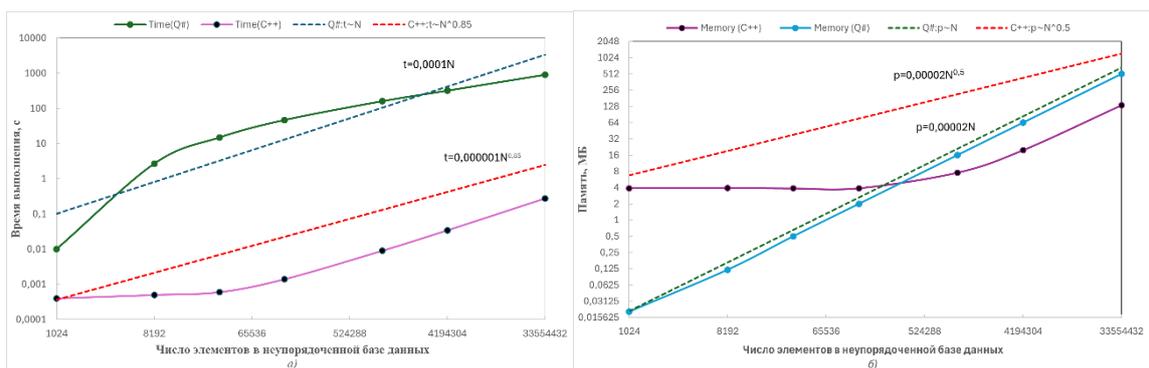
**Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма параллельного поиска**

Особенностью данного алгоритма является одновременный поиск в нескольких потоках. Исходный массив данных разбивается на  $P$  непересекающихся сегментов, где  $P$  – количество используемых потоков. Для каждого сегмента запускается отдельный поток, который независимо выполняет поиск заданного элемента в своём диапазоне данных. Поиск внутри каждого потока осуществляется последовательно и может быть остановлен досрочно, если искомым элемент найден. После завершения всех потоков их результаты объединяются, и алгоритм возвращает информацию о наличии элемента и, при необходимости, его позицию. Время выполнения данного алгоритма может быть оценено как  $O(N/P)$ .

Результаты реализации данных алгоритмов представлены ниже в таблице и на рис. 3. Основными критериями сравнения являлись время нахождения искомого элемента, а также объём памяти, задействованный алгоритмом при решении задачи поиска.

**Таблица – Сравнение эффективности алгоритма Гровера, реализованного на языке Q#, и классического алгоритма параллельного поиска, реализованного на языке программирования C++**

Число элементов в неупорядоченной базе данных	Параллельный поиск на C++	Алгоритм Гровера на Q#
$2^{10} = 1024$	0,0004 с / 3,89 МБ	0.01 с / 0,02 МБ
$2^{13} = 8192$	0,0005 с / 3,92 МБ	2.7 с / 0,12 МБ
$2^{15} = 32768$	0,0006 с / 3,86 МБ	15 с / 0,5 МБ
$2^{17} = 131072$	0,0014 с / 3,89 МБ	47 с / 2 МБ
$2^{20} = 1048576$	0,0090 с / 7,56 МБ	161 с / 16 МБ
$2^{22} = 4194304$	0,0342 с / 19,7 МБ	322 с / 64 МБ
$2^{25} = 33554432$	0,2750 с / 134 МБ	910 с / 512 МБ



**Рисунок 3 – Сравнение алгоритма параллельного поиска на C++ и симуляции алгоритма Гровера на Q# в зависимости от числа элементов в неупорядоченной базе данных  $N$  (логарифмическая шкала): а) зависимость времени выполнения алгоритмов от числа элементов; б) зависимость памяти, затраченной на выполнение алгоритмов от числа элементов**

Практическое сравнение демонстрирует, что при реальной реализации классический алгоритм поиска выполняется быстрее, чем квантовый алгоритм Гровера на языке Q#. Это обусловлено тем, что выполнение алгоритма Гровера осуществляется на классическом симуляторе квантовых вычислений, а также усложнением вычислительного процесса при реализации квантового оракула и управляемых операций.

Кроме того, квадратичное ускорение алгоритма Гровера носит асимптотический характер и проявляется только при достаточно больших размерах пространства поиска при реализации на квантовом компьютере.

Таким образом, результаты эксперимента подчёркивают, что классические алгоритмы поиска остаются эффективными для большинства практических применений при выполнении на классических устройствах, а преимущества алгоритма Гровера проявляются только при работе с реальными квантовыми устройствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Celik, N. Analysis of grover's quantum search algorithm on a classical computer: Identifying opportunities for improvement / N. Celik, O. Bingol // *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*. – 2024. – Vol. 42, № 4. – P.1039–1049.
2. Grover, L. K. A fast quantum mechanical algorithm for database search // *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*. – 1996. – P. 212-219.
3. Preskill, J. Quantum computing in the NISQ era and beyond // *Quantum*. – 2018. – Vol. 5. – P. 1–20.
4. Nielsen, M.A. *Quantum Computation and Quantum Information* / M.A. Nielsen, I.L. Chuang – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – P. 318.
5. Diehl, P. *Parallel C++: Efficient and Scalable High-Performance Parallel Programming Using HPX* / P. Diehl, S. R. Brandt, H. Kaiser – Springer, 2024. – P. 59–79.

## ШУМ ПЕРЛИНА КАК ИНСТРУМЕНТ МОУШН-ДИЗАЙНЕРА

Современные анимационные проекты часто требуют включения элементов случайности для построения различных видов движения – колебания объектов, дрожания камеры, генерации и движения частиц, хаотичного изменения параметров эффектов и т.д. Покадровое ручное создание и редактирование подобных эффектов представляет собой весьма трудоемкий процесс. Автоматизировать эти процессы позволяет так называемая процедурная анимация, в основе которой для генерации эффектов движения в режиме реального времени лежат математические алгоритмы, законы движения и пр. Одним из часто используемых алгоритмов процедурной генерации псевдослучайных данных является шум Перлина.

Шум Перлина формирует сглаженные, взаимосвязанные колебания, обеспечивая непрерывность функции и плавные переходы между значениями, и широко применяется как в двухмерной, так и в трехмерной графике [1]. Преимущественно он используется при создании текстур и генерации поверхностей и рельефов, позволяя увеличивать графическую сложность поверхности геометрических объектов. Другой сферой применения функции шума Перлина является получение компьютерных спецэффектов природных явлений, таких как эффекты дыма, тумана, ветра, моделирование облаков, а также ряда эффектов движения непрерывного характера.

Обсудим некоторые аспекты использования функций, основанных на принципах шума Перлина, в одной из распространенных на текущий момент в медиаиндустрии программ для моушн-дизайна – Adobe After Effects.

В Adobe After Effects шум Перлина лежит в основе функций `noise` и `wiggle`. Функция `noise` принимает только один числовой аргумент – текущее время композиции в секундах (или любой другой параметр, изменяющейся во времени), и возвращает не превосходящее единицы по абсолютной величине псевдослучайное число. Ключевая особенность функции `noise` заключается в том, что она возвращает не независимые случайные числа, а взаимосвязанные значения — близкие входные аргументы дают близкие выходные результаты. Благодаря этому удастся сформировать непрерывную траекторию изменения параметра без резких скачков между кадрами. Таким образом, исполь-

зую функцию `noise`, можно создавать плавную анимацию, имитирующую естественные процессы, такие как мерцание света, покачивание объектов, легкое дрожание камеры и т.д.

Функция `wiggle`, также обеспечивающая непрерывные изменения значений без резких скачков, представляет собой более гибкий инструмент за счет наличия как обязательных, так и необязательных аргументов, позволяющих более точно управлять характером колебаний. В частности, с ее помощью можно дополнительно задать интенсивность движения.

Функции, основанные на шуме Перлина, применяются в широком спектре задач, где необходимо создание эффекта тряски или плавного движения объекта. Например, функция `noise` идеально подходит для имитации колебания стрелки компаса (рис. 1), при этом для определения диапазона отклонения на  $a$  градусов при вызове функции необходимо добавить коэффициент:  $a * noise(time)$ .



Рисунок 1 – Кадр анимации компаса

Другим примером может служить имитация съемки ручной камерой («дрожания» кадра). Этот эффект довольно часто применяется в киноиндустрии при решении разных задач – для создания ощущения документальной съемки или для имитации тряски, вызванной естественными причинами (взрыв или землетрясение) и т.д. В этом случае следует воспользоваться функцией `wiggle`. При этом, для достижения характерной для проекторов прошлого «тряски» изображения функцию `wiggle` необходимо применить к положению всех объектов, присутствующих в кадре.

Создание колебаний нередко применяется и в векторной анимации для «оживления» статичных изображений путем создания естественного движения. Одним из примеров подобного подхода является анимация полета космической ракеты (рис. 2), точнее имитации «тряски» ракеты при высокой скорости передвижения. При этом функция используется для двух параметров – Положение и Поворот.

Следует также заметить, что не существует универсального алгоритма для точного подбора значений аргументов функции `wiggle`,

их выбор обусловлен художественными и композиционными особенностями конкретной анимации.



**Рисунок 2 – Кадр анимации ракеты**

Та же анимация может быть реализована с помощью функции `poise`. Однако, для достижения реалистичного эффекта тряски данную функцию требуется доработать, создав для нее параметры амплитуды и частоты вручную. В противном случае анимация похожа не на тряску, а на покачивание, свойственное движению маятника. Увеличение скорости анимации также не способствует получению желаемого эффекта.

Еще одним преимуществом функции `wiggle` является возможность ее применения к анимации параметров, не связанных с перемещением объектов в пространстве. Так, например, можно анимировать непрозрачность объекта для создания эффекта мигания. Возможности использования данной функции не ограничены, и она находит свое применение в любом виде анимации, где необходимо создание естественного и плавного изменения состояния какого-либо объекта. Используя ее, пользователь может использовать для имитации естественных процессов – покачивания, дрожания, мерцания и других реалистичных эффектов.

Несмотря на то, что функция `wiggle` является более универсальной функцией по сравнению с `poise` для создания плавных колебаний за счет простоты использования и большого количества настраиваемых параметров, можно с уверенностью сказать, что знание принципов работы каждой функции позволяет осознанно выбирать инструменты и создавать более точные и гибко настраиваемые анимации. И, следовательно, позволяет разработчикам оптимизировать свои рабочие процессы и более эффективно справляться с поставленными задачами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Слеповичев С.О. Шум Перлина как способ получения компьютерных спецэффектов природных явлений. // Инновационное развитие. 2017. №2 (7). С. 32-33.

## 8.4 Подсекция "ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА, ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ"

УДК 517.977

А.А. Якименко, доц., канд. физ.-мат. наук  
(БГТУ, г. Минск)

### К ВОПРОСУ О МОДАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ДВУМЕРНОЙ ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ С ПЯТЬЮ СОИЗМЕРИМЫМИ ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ

Рассмотрим линейную стационарную систему с запаздывающим аргументом с одним входом и пятью соизмеримыми запаздываниями:

$$\dot{x}(t) = \sum_{j=0}^5 A_j x(t - jh) + bu(t), \quad (1)$$

где  $A_j, j = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  – постоянные  $(2 \times 2)$ -матрицы;  $h > 0$  – постоянное запаздывание;  $b$  – постоянный 2-вектор;  $u$  – скалярное управление. Не ограничивая общности, можно считать, что  $b' = (0 \ 1)$  (штрих  $(\cdot)'$  означает транспонирование).

Характеристическое уравнение разомкнутой (с нулевым управлением) системы (1) имеет вид

$$\begin{aligned} \det \left[ \lambda I_2 - \sum_{i=0}^5 A_i e^{-i\lambda h} \right] &\equiv \lambda^2 + \\ &+ (\alpha_{10} + \alpha_{11} e^{-\lambda h} + \alpha_{12} e^{-2\lambda h} + \alpha_{13} e^{-3\lambda h} + \alpha_{14} e^{-4\lambda h} + \alpha_{15} e^{-5\lambda h}) \lambda + \\ &+ \alpha_{00} + \alpha_{01} e^{-\lambda h} + \alpha_{02} e^{-2\lambda h} + \alpha_{03} e^{-3\lambda h} + \alpha_{04} e^{-4\lambda h} + \\ &+ \alpha_{05} e^{-5\lambda h} + \alpha_{06} e^{-5\lambda h} + \alpha_{07} e^{-7\lambda h} + \alpha_{08} e^{-8\lambda h} + \\ &+ \alpha_{09} e^{-9\lambda h} + \alpha_{10} e^{-10\lambda h} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\lambda \in \mathbb{C}$ ,  $e^{-j\lambda h}$  – оператор сдвига ( $e^{-i\lambda h} x(t) \equiv x(t - ih)$ ).

Присоединим к системе (1) регулятор вида

$$u(t) = \sum_{i=0}^M q'_i x(t - ih) + \int_{-lh}^0 g'(s) x(t + s) ds, \quad (3)$$

где  $l, M \in \mathbb{N}$ ,  $q_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, M - 2$ -векторы;  $g(s)$ ,  $s \in [-h, 0]$  – непрерывная 2-вектор-функция.

В частотной области регулятор (3) имеет вид

$$U(\lambda) = \sum_{j=0}^M q'_j e^{-j\lambda h} + G(\lambda), \quad (4)$$

где  $G(\lambda)$  – целая функция, определяющая интегральную часть (3).

**Определение.** Система (1) модально управляема регулятором вида (3), если для наперед заданных чисел  $\tilde{\alpha}_{ij}$ ,  $i = 0, j = \overline{0, 10}$ ;  $i = 1, j = \overline{0, 5}$  найдется такой регулятор, при котором характеристическое уравнение замкнутой системы (1), (3) будет иметь вид (сравните с формулой (2)):

$$\begin{aligned} \det \left[ \lambda I_2 - \sum_{i=0}^5 A_i e^{-i\lambda h} - bU(\lambda) \right] \equiv & \lambda^2 + \\ & + \left( \tilde{\alpha}_{10} + \tilde{\alpha}_{11} e^{-\lambda h} + \tilde{\alpha}_{12} e^{-2\lambda h} + \tilde{\alpha}_{13} e^{-3\lambda h} + \tilde{\alpha}_{14} e^{-4\lambda h} + \tilde{\alpha}_{15} e^{-5\lambda h} \right) \lambda + \\ & + \tilde{\alpha}_{00} + \tilde{\alpha}_{01} e^{-\lambda h} + \tilde{\alpha}_{02} e^{-2\lambda h} + \tilde{\alpha}_{03} e^{-3\lambda h} + \tilde{\alpha}_{04} e^{-4\lambda h} + \\ & + \tilde{\alpha}_{05} e^{-5\lambda h} + \tilde{\alpha}_{06} e^{-6\lambda h} + \tilde{\alpha}_{07} e^{-7\lambda h} + \tilde{\alpha}_{08} e^{-8\lambda h} + \\ & + \tilde{\alpha}_{09} e^{-9\lambda h} + \tilde{\alpha}_{10} e^{-10\lambda h} = 0. \end{aligned}$$

Пусть 
$$\mu_1 = \sum_{i=0}^5 \tilde{\alpha}_{1i} m^i; \quad (5)$$

$$\mu_2 = \sum_{i=0}^{10} \tilde{\alpha}_{0i} m^i, \quad (6)$$

где  $\tilde{\alpha}_{ij}$ ,  $i = 0, j = \overline{0, 10}$ ;  $i = 1, j = \overline{0, 5}$  – произвольные числа. Тогда система (1), замкнутая регулятором, решающим задачу модального управления, имеет следующее характеристическое уравнение:

$$\lambda^2 + \mu_1 \lambda + \mu_2 = 0. \quad (7)$$

Обозначим  $m = e^{-\lambda h}$  – оператор сдвига ( $mx(t) = x(t - h)$ ),

$A(m) = \sum_{i=0}^5 A_i m^i$ . Не ограничивая общности, можно считать, что матрица  $A(m)$  имеет вид

$$A(m) = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^5 a_i m^i & \sum_{i=0}^4 b_i m^i + m^5 \\ a_{21}(m) & a_{22}(m) \end{bmatrix},$$

где

$$a_{21}(m) = \sum_{i=0}^5 a_{21i} m^i; \quad a_{22}(m) = \sum_{i=0}^5 a_{22i} m^i. \quad (8)$$

В данном докладе рассмотрим случай

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a_5 = 0. \quad (9)$$

Тогда матрица  $A(m)$  примет вид

$$A(m) = \begin{bmatrix} a_0 & \sum_{i=0}^4 b_i m^i + m^5 \\ a_{21}(m) & a_{22}(m) \end{bmatrix}.$$

Регулятор, решающий задачу модального управления, в частотной области можно взять в виде:

$$u_1(\lambda, m) = -\frac{a_0^2 + a_0 \mu_1 + \mu_2}{b_0 + b_1 k + b_2 k^2 + b_3 k^3 + b_4 k^4 + k^5} - a_{21}(m); \quad (10)$$

$$\begin{aligned} u_2(\lambda, m) = & -a_0 - \mu_1 - a_{22}(m) + \\ & \frac{(a_0^2 + \mu_1 a_0 + \mu_2)}{b_0 + b_1 k + b_2 k^2 + b_3 k^3 + b_4 k^4 + k^5} \times \\ & \times (k^4 + (m + b_4)k^3 + (m^2 + b_4 m + b_3)k^2 + \\ & + (m^3 + b_4 m^2 + b_3 m + b_2)k + m^4 + b_4 m^3 + \\ & + b_3 m^2 + b_2 m + b_1) \times \frac{(m - k)}{\lambda - a_0}. \end{aligned} \quad (11)$$

где  $k = e^{-a_0 h}$ . Для того, чтобы регуляторы (10), (11) имели смысл, необходимо и достаточно выполнения условия:

$$b_0 + b_1 k + b_2 k^2 + b_3 k^3 + b_4 k^4 + k^5 \neq 0. \quad (12)$$

Таким образом, справедлива

**Теорема.** Для того чтобы система (1) была модально управляема регулятором вида (3) в случае (9), необходимо и достаточно выполнения условия (12). При этом регуляторы, решающие задачу модального управления, в частотной области имеют вид (10), (11).

**Пример.** Рассмотрим систему (1) с матрицами

$$\begin{aligned} A_0 &= \begin{bmatrix} 2 & 4 \\ a_{210} & a_{220} \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{211} & a_{221} \end{bmatrix}, \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ a_{212} & a_{222} \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 3 \\ a_{213} & a_{223} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & 5 \\ a_{214} & a_{224} \end{bmatrix}, A_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_{215} & a_{225} \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда матрица  $A(m)$  имеет вид

$$A(m) = \begin{bmatrix} 2 & 4 + m + 2m^2 + 3m^3 + 5m^4 + m^5 \\ a_{21}(m) & a_{22}(m) \end{bmatrix},$$

где

$$a_{21}(m) = \sum_{i=0}^5 a_{21i} m^i;$$

$$a_{22}(m) = \sum_{i=0}^5 a_{22i} m^i.$$

Обозначим  $k = e^{-a_0 h} = e^{-2h} \in \mathbb{R}$ . Проверим выполнение условия (18):

$$\begin{aligned} & b_0 + b_1 k + b_2 k^2 + b_3 k^3 + b_4 k^4 + k^5 = \\ & = 4 + e^{-2h} + 2e^{-4h} + 3e^{-8h} + 5e^{-16h} + e^{-32h} > 0. \end{aligned}$$

Условие (18) выполнено. Тогда регуляторы (19), (20) примут вид

$$u_1(\lambda, m) = -\frac{4 + 2\mu_1 + \mu_2}{4 + e^{-2h} + 2e^{-4h} + 3e^{-8h} + 5e^{-16h} + e^{-32h}} - \sum_{i=0}^5 a_{21i} m^i;$$

$$\begin{aligned} u_2(\lambda, m) &= -2 - \mu_1 - \sum_{i=0}^5 a_{22i} m^i + \\ &+ \frac{(4 + 2\mu_1 + \mu_2)}{4 + e^{-2h} + 2e^{-4h} + 3e^{-8h} + 5e^{-16h} + e^{-32h}} \times \\ &\times (e^{-16h} + m^4 + 5m^3 + 3m^2 + 2m + 1 + \\ &+ k(m^3 + 5m^2 + 3m + 2) + k^2(m^2 + 5m + 3) + \\ &+ k^3(m + 5)) \times \frac{(m - e^{-2h})}{\lambda - 2}. \end{aligned}$$

Нетрудно проверить, что система (1), замкнутая этим регулятором, имеет характеристическое уравнение вида

$$\lambda^2 + \mu_1 \lambda + \mu_2 = 0,$$

где  $\mu_1, \mu_2$  определены в формулах (5), (6).

## СТАБИЛИЗИРУЕМОСТЬ СИСТЕМ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Задача стабилизации динамических систем является одной из важнейших задач в качественной теории управления. С помощью воздействия регулятора, построенного по принципу обратной связи, необходимо обеспечить устойчивость замкнутой системы. Изучение качественных свойств систем с запаздыванием представляет особый интерес. Примерами таких систем могут служить транспортные, коммуникационные системы, системы, описывающие химические процессы, системы окружающей среды и энергетические системы. В докладе исследуются условия, при которых система третьего порядка с запаздыванием стабилизируема регулятором, не выводящим систему за пределы рассматриваемого класса. Предлагаются способы выбора регулятора, обеспечивающего устойчивость рассматриваемой системы.

Пусть система с запаздыванием имеет вид:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t-h) + bu(t), \quad (1)$$

где  $x(t) \in R^n$ ,  $b \in R^n$ ,  $t > 0$ ,  $A$ ,  $A_1$  – матрицы соответствующих размеров,  $h > 0$  – постоянное запаздывание,  $u(t) \in R$  – управляющее воздействие.

Чтобы движение системы было определенным для  $t \geq 0$ , зададим начальные условия:  $x(t) = \varphi(t)$ ,  $-h \leq t < 0$ ,  $x(0) = x_0$ , где  $\varphi(t)$  – непрерывная функция,  $x_0$  –  $n$ -вектор.

Введем регулятор

$$u(t) = q_0'x(t) + q_1'x(t-h) \quad (2)$$

не выводящий систему за пределы рассматриваемого класса ( $q_0$ ,  $q_1$  –  $n$ -векторы).

Систему (1) назовем стабилизируемой, если существует регулятор вида (2), при котором корни характеристического уравнения замкнутой системы

$$\det \left[ \lambda E - A - A_1 e^{-\lambda h} - b(q_0' + q_1' e^{-\lambda h}) \right] = 0$$

имеют отрицательные действительные части.

Исследуем возможность стабилизации системы третьего порядка вида

$$(1), \text{ когда } A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} a_{11}^1 & a_{12}^1 & a_{13}^1 \\ a_{21}^1 & a_{22}^1 & a_{23}^1 \\ a_{31}^1 & a_{32}^1 & a_{33}^1 \end{bmatrix}.$$

Регулятор (2) будет иметь вид:

$$u(t) = [q_{01} \ q_{02} \ q_{03}]x(t) + [q_{11} \ q_{12} \ q_{13}]x(t-h).$$

Запишем характеристический квазиполином системы (1), замкнутой регулятором вида (2):

$$\begin{aligned} \det \begin{bmatrix} \lambda - a_{11} - a_{11}^1 e^{-\lambda h} & -a_{12} - a_{12}^1 e^{-\lambda h} & -a_{13} - a_{13}^1 e^{-\lambda h} \\ -a_{21} - a_{21}^1 e^{-\lambda h} & \lambda - a_{22} - a_{22}^1 e^{-\lambda h} & -a_{23} - a_{23}^1 e^{-\lambda h} \\ -a_{31} - a_{31}^1 e^{-\lambda h} - \tilde{q}_1 & -a_{32} - a_{32}^1 e^{-\lambda h} - \tilde{q}_2 & \lambda - a_{33} - a_{33}^1 e^{-\lambda h} - \tilde{q}_3 \end{bmatrix} = \\ = (\lambda - a_{11} - a_{11}^1 e^{-\lambda h}) [(\lambda - a_{22} - a_{22}^1 e^{-\lambda h})(\lambda - a_{33} - a_{33}^1 e^{-\lambda h} - \tilde{q}_3) - \\ - (a_{32} + a_{32}^1 e^{-\lambda h} + \tilde{q}_2)(a_{23} + a_{23}^1 e^{-\lambda h})] + (a_{12} + a_{12}^1 e^{-\lambda h}) [(-a_{21} - a_{21}^1 e^{-\lambda h}) \times \\ \times (\lambda - a_{33} - a_{33}^1 e^{-\lambda h} - \tilde{q}_3) - (a_{31} + a_{31}^1 e^{-\lambda h} + \tilde{q}_1)(a_{23} + a_{23}^1 e^{-\lambda h})] + \\ + (-a_{13} - a_{13}^1 e^{-\lambda h}) [(a_{21} + a_{21}^1 e^{-\lambda h})(a_{32} + a_{32}^1 e^{-\lambda h} + \tilde{q}_2) + (a_{31} + a_{31}^1 e^{-\lambda h} + \tilde{q}_1) \times \\ \times (\lambda - a_{22} - a_{22}^1 e^{-\lambda h})], \end{aligned}$$

где  $\tilde{q}_1 = q_{01} + q_{11}e^{-\lambda h}$ ,  $\tilde{q}_2 = q_{02} + q_{12}e^{-\lambda h}$ ,  $\tilde{q}_3 = q_{03} + q_{13}e^{-\lambda h}$ .

Выберем  $\tilde{q}_1$ ,  $\tilde{q}_2$ ,  $\tilde{q}_3$  таким образом, чтобы характеристический квазиполином распался на 3 множителя. Пусть

$$\tilde{q}_1 = -a_{21} - a_{31} - a_{21}^1 e^{-\lambda h} - a_{31}^1 e^{-\lambda h},$$

$$\tilde{q}_2 = a_{23} - a_{32} + a_{23}^1 e^{-\lambda h} - a_{32}^1 e^{-\lambda h},$$

$$\tilde{q}_3 = -a_{33} + a_{22} - a_{33}^1 e^{-\lambda h} + a_{22}^1 e^{-\lambda h}.$$

Потребуем также, чтобы выполнялись равенства:  $a_{13} = -a_{12}$ ,  $a_{13}^1 = -a_{12}^1$ . Тогда характеристическое уравнение замкнутой системы примет вид:

$$\begin{aligned}
& (\lambda - a_{11} - a_{11}^1 e^{-\lambda h}) \left( (\lambda - a_{22} - a_{22}^1 e^{-\lambda h})^2 - (a_{23} + a_{23}^1 e^{-\lambda h})^2 \right) = 0, \\
& (\lambda - a_{11} - a_{11}^1 e^{-\lambda h}) (\lambda - a_{22} - a_{22}^1 e^{-\lambda h} - a_{23} - a_{23}^1 e^{-\lambda h}) \times \\
& \quad \times (\lambda - a_{22} - a_{22}^1 e^{-\lambda h} + a_{23} + a_{23}^1 e^{-\lambda h}) = 0, \\
& (\lambda - a_{11} - a_{11}^1 e^{-\lambda h}) \times \\
& \times (\lambda + (-a_{22} - a_{23}) + (-a_{22}^1 - a_{23}^1) e^{-\lambda h}) (\lambda + (-a_{22} + a_{23}) + (-a_{22}^1 + a_{23}^1) e^{-\lambda h}) = 0.
\end{aligned}$$

Воспользуемся следующей леммой:

**Лемма.** Пусть  $\alpha, \beta$  – действительные числа, Тогда корни уравнения

$$\lambda + \alpha + \beta e^{-\lambda h} = 0$$

имеют только отрицательные действительные части в том и только в том случае, если точка  $(\alpha, \beta)$  принадлежит области устойчивости  $\Omega$ , граница которой описывается формулами:

$$\beta = -\alpha, \begin{cases} \alpha + \beta \cosh g = 0, \\ g - \beta \sinh g = 0, \end{cases} \quad 0 < g < \frac{\pi}{h}.$$

Получаем следующее достаточное условие стабилизируемости:

**Утверждение.** Система третьего порядка с запаздыванием вида (1) стабилизируема регулятором (2), если выполняются следующие условия:

1.  $a_{13} = -a_{12}, a_{13}^1 = -a_{12}^1.$
2.  $(-a_{11}, -a_{11}^1) \in \Omega, (-a_{22} - a_{23}, -a_{22}^1 - a_{23}^1) \in \Omega,$   
 $(-a_{22} + a_{23}, -a_{22}^1 + a_{23}^1) \in \Omega,$

где  $\Omega$  – область устойчивости для корней уравнения  $\lambda + \alpha + \beta e^{-\lambda h} = 0.$

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

В современном производстве, для эффективной работы широко применяется математическое моделирование. Используя такие модели, инженер может проектировать производственные линии с максимальной производительностью. Что бы, не было ситуаций, когда продукции одного станка недостаточно, для полной загрузки следующего станка, который ее потребляет или наоборот. В результате чего есть простои, нарушение производственного ритма. К сожалению, такое явление не редкость в реальной жизни (пример Борисовского ДОК).

В лесозаготовительной промышленности на смену традиционным бензопилам и трелевочным тракторам пришла новая лесозаготовительная техника: харвестеры (машины, выполняющие комплекс операций: валку деревьев, их очистку от сучьев и раскряжевку на нужные сортименты), форвардеры (машины, выполняющие работы по сортировке, сбору и вывозу сортиментов с места, где происходит валка леса) и целый ряд других машин и новых технологий. Специалисту приходится анализировать работу как отдельных узлов машин, так и всей технологической линии.

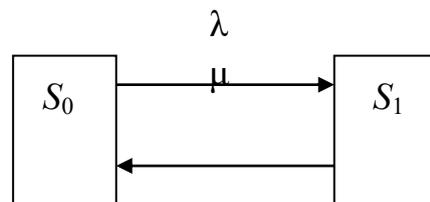
Без математических моделей организовать их высокоэффективную работу практически невозможно.

В лесной промышленности есть много случайных факторов, которые не позволяют строить детерминированные математические модели. К ним относятся: погодные условия, непостоянство размерно-качественных характеристик заготавливаемого сырья, состояние лесных дорог, породы и возраст древесины, состав и местоположение лесосеки, время года и некоторые другие. Учитывая эти факторы, строятся стохастические математические модели исследуемого объекта. Они обычно записываются в виде дифференциальных уравнений Колмогорова (теория массового обслуживания).

Поясним это на примере работы лесозаготовительной пары «харвестер - форвардер». При достаточно широком выборе однотипных машин, очень важно правильно сформировать их в эффективные технологические линии. Хотя каждая из вышеуказанных машин имеет заводские характеристики, но этого недостаточно для составления высокоэффективной лесозаготовительной пары «харвестер - форвардер». Дело в том, что заводские технические характеристики как правило

усредненные и прямое их сопоставление далеко от оптимальной пары. Работа харвестера и форвардера очень сильно зависит от породы и возраста древесины, состава и местоположения лесосеки, времени года и некоторых других факторов. Решение этой проблемы практически невозможно без математического моделирования работы исследуемых объектов «харвестер - форвардер»

Для построения математической модели работы пары «харвестер – форвардер» рассмотрим граф состояний работы форвардера (рис. 1).



**Рисунок 1 – Граф состояний форвардера**

Работа системы лесозаготовительных машин «харвестер – форвардер» характеризуется следующими параметрами: харвестер осуществляет заготовку сортиментов на лесосеке с интенсивностью  $\lambda$  сортиментов в час; форвардер осуществляет сбор и транспортировку сортиментов на погрузочный пункт с интенсивностью  $\mu$  сортиментов в час. При этом форвардер может находиться в следующих состояниях:  $S_0$  – простаивать из-за временного отсутствия заготавливаемых харвестером сортиментов;  $S_1$  – осуществлять сбор и транспортировку сортиментов на погрузочный пункт. Из свободного состояния  $S_0$  в рабочее  $S_1$  форвардер переходит с интенсивностью  $\lambda$ , обратно переход осуществляется с интенсивностью  $\mu$ .

Обозначим  $P_i(t), i = \overline{0,1}$  – вероятность того, что в момент времени  $t$  система машин «харвестер – форвардер» находится в состоянии  $S_i, i = \overline{0,1}$ . Тогда модель функционирования системы (дифференциальные уравнения Колмогорова для вероятностей состояний) будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\lambda P_0 + \mu P_1; \\ \frac{dP_1}{dt} = \lambda P_0 - \mu P_1; \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Неизвестные параметры  $\lambda$  и  $\mu$  устанавливаются следующим образом:  $\lambda = 1/t_3$ , где  $t_3$  – продолжительность цикла заготовки сортиментов харвестером;  $\mu = 1/t_T$ , где  $t_T$  – продолжительность цикла сбора, транспортировки, разгрузки и подсортировки сортиментов форвардером.

При исследовании работы лесозаготовительного оборудования на протяжении длительного промежутка времени месяц, год и т.д. (установившийся режим работы), можно считать, что  $P_0 = \text{const}$ ,  $P_1 = \text{const}$  (финальные вероятности состояния). Ошибка при принятии данного допущения не превышает 8% [1, 2].

В этом случае система дифференциальных уравнений (1) преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda P_0 + \mu P_1; \\ 0 = \lambda P_0 - \mu P_1; \\ P_0 + P_1 = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему уравнений относительно вероятностей состояний  $P_0$  и  $P_1$  получим выражения для расчета режимов работы системы машин «харвестер – форвардер»:

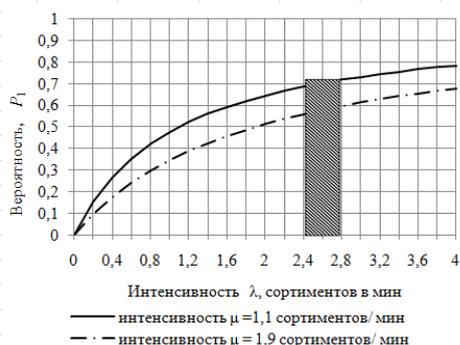
$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (3)$$

$$P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (4)$$

Полученные зависимости вероятностей состояний системы машин «харвестер – форвардер» позволяют установить рациональные значения параметров рассматриваемых машин.

Технология работы с зависимостями следующая: на основе конкретных природно-производственных условий выбирается марка оборудования, например форвардера, работа которого характеризуется интенсивностью  $\mu$ ; из зависимостей (3) и (4) устанавливается рациональное значение параметра  $\lambda$ , по которому в дальнейшем подбирается конкретная марка харвестера [1, 2].

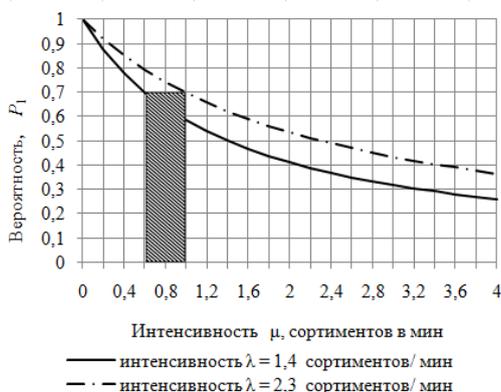
На рис. 2 приведен пример установления рациональной интенсивности  $\lambda$  работы харвестера в зависимости от конкретной интенсивности  $\mu$  работы форвардера.



**Рисунок 2 – Установление рациональной интенсивности  $\lambda$  работы харвестера в зависимости от конкретной интенсивности  $\mu$  работы форвардера**

Принятый на основании рис. 2 оптимальный диапазон значений  $\lambda^*$  (зона штриховки) позволяет осуществить выбор требуемого харвестера, обеспечивающего рациональную загрузку применяемого форвардера, т. к. при этом обеспечивается оптимальная величина вероятности его работы  $P_1^*$ .

Возможно решение и обратной задачи – установления рациональной интенсивности  $\mu$  работы форвардера в зависимости от конкретной интенсивности  $\lambda$  работы харвестера (рис. 3).



**Рисунок 3 – Установление рациональной интенсивности  $\mu$  работы форвардера в зависимости от конкретной интенсивности  $\lambda$  работы харвестера**

Данная математическая модель может быть использована на производстве, при составлении эффективной системы машин «харвестер – форвардер» в зависимости от конкретных природно-производственных условий, при наименьших экономических затратах.

Поясним это на реальном примере подбора оптимальной пары в условиях нашей республики. На предприятии имеется харвестер Амкодор 2551, работающий с интенсивностью заготовки сортиментов  $\lambda = 1,4\text{--}2,3$  сортиментов/мин и форвардеры МПТ-461.1, МЛ-131 и Амкодор 2661.01, работающие с интенсивностью подвозки сортиментов соответственно  $\mu = 0,8\text{--}1,3$  сортиментов/мин,  $\mu = 0,7\text{--}1,2$  сортимен-

тов/мин и  $\mu = 1,1-1,9$  сортиментов/мин. Нужно составить оптимальную пару «харвестер – форвардер».

На основании зависимостей рис. 3 оптимальная интенсивность работы форвардера (заштрихованная зона) составляет  $\mu^* \leq 1,1$  сортимента/мин. Наиболее близкой интенсивностью работы для харвестера Амкодор 2551 обладает форвардер Амкодор 2661.01.

При правильном выборе пары харвестер – форвардер решаются сразу две задачи экономики: низкая стоимость при закупке механизмов и низкие эксплуатационные затраты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатенко В. В., И. В. Турлай И. В., Федоренчик А. С. Моделирование и оптимизация процессов лесозаготовок. Минск: БГТУ, 2004. 178 с.

2. Игнатенко В. В., Леонов Е. А. Установление рациональных параметров многооперационных машин в лесозаготовительной промышленности // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 5–4. С. 291–295.

УДК 004.8

В.Ф. Слепцов, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

#### **ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ – ИЛЛЮЗИЯ ИНТЕЛЛЕКТА**

Анализируя материалы об Искусственном Интеллекте (ИИ), прихожу к выводу, что пора понять суть явления, которое сегодня называют искусственным интеллектом. Из комментариев я понял, что существует много иллюзий об универсальных, облачных, глобальных супермоделях ИИ, которые знают все и мало понимания, что нужно, чтобы считать эту систему интеллектом. Общепризнанного определения интеллекта до сих пор нет.

По-видимому, пришло время определить и оценить реальную действительность в понимании смысла генеративного ИИ.

Вспомним, что такое по смыслу современный искусственный интеллект, он же нейросети, он же генеративный ИИ, он же большие языковые модели. Далее выясним, какие врожденные и неустранимые пока недостатки не позволяют считать современный ИИ интеллектом, а, следовательно, невозможность использовать ИИ в профессиональных целях. Попробуем разобраться, как имея массу недостатков, ИИ-боты реально совершили и совершают революцию, привлекая по некоторым оценкам триллионы долларов инвестиций. Попробуем понять, насколько обоснованы страхи в отношении современного ИИ и

существуют ли реально все те риски, от которых так усиленно страхуются целые континенты. В конце материала разберем структуру профессиональной системы доменного интеллекта, чтобы быть интеллектом, и какую роль будут играть в них языковые модели.

Основой современного ИИ являются большие языковые модели Large Language Models (LLM) на базе искусственных нейросетей. LLM – это огромная статистическая машина, которая читает миллиарды текстов и учится предсказывать, какое слово должно идти следующим. За счет того, что текстов много и они покрывают почти все области человеческой деятельности, модель начинает выглядеть, как понимающий язык. Она может объяснять, рассуждать, отвечать на вопросы, писать код и поддерживать диалог [1].

Однако, LLM – не интеллект, внутри нее нет формализованных понятий, причинной модели мира, целей как намерений и критерий истины, есть лишь статистическая модель языка, оптимизированная под правдоподобное продолжение текста. Благодаря оптимизированной статистической модели LLM способна выглядеть разумной, не обладая собственным пониманием реальности. Чем больше модель и, соответственно, больше текстов она выучила, тем больше она похожа на разумную.

LLM не рассуждает и не вычисляет в формальном смысле. Она не оперирует объектами, не выводит следствия и не проверяет истинность своих выводов. Вместо этого она статистически реконструирует форму рассуждений и вычислений на основе языковых закономерностей и данных, которые заложены в основу ее обучения.

Проще говоря, модель угадывает ход рассуждений и вычислений, исходя из накопленной статистики. Она не решает задачу, а генерирует текст, который выглядит как ее решение. По своей природе LLM не справочная система и не база знаний, но ее можно использовать и в этом смысле. Это генеративная языковая модель, которая не извлекает факты, а реконструирует правдоподобные формулировки на основе статистики языка. Модель не находит знание, а воспроизводит его текстовую форму, без внутреннего критерия истины и без связи с реальностью.

Полной объяснимости у LLM не существует, т.е. мы не можем точно и достоверно объяснить, как модель получила каждый результат. Проще говоря, благодаря последним исследованиям мы о чем-то догадываемся, но только отчасти. Нет прозрачного вывода, нет формализуемого доказательства, нет причинной трассировки решения. То, что выглядит рассуждением, – это его лингвистическая иллюзия.

Для профессии, как вы понимаете, это недопустимо. Языковые модели нестабильны и недетерминированы. Попробуйте задать один и тот же вопрос несколько раз даже с самым лучшим чат-ботом, и получите разные ответы, иногда противоречивые. Мы уже говорили об этом, описывая LLM чуть раньше. Они изображают смысл, но не владеют им. Это делает их логически ненадежными [2].

Генеративные модели неизбежно подвержены галлюцинациям, что является следствием архитектуры. Модель видит только вероятность слов, она создает красивый текст по статистике, а если знания слабые, то дорисовывают картину. Модель по-прежнему не знает, где истина, а где правдоподобная выдумка. В силу перечисленных свойств универсальные модели могут быть помощниками, консультантами, анализаторами текста, инструментами генерации, интерфейсами к базам знаний. Однако, в любом случае результаты требуют тщательной оценки и проверки.

В чистом виде LLM не могут быть профессионалами, врачами, юристами, инженерами, аналитиками, стратегами или проверяющими. Даже если внешне модель выглядит компетентной, это не профессиональный субъект.

Если сказать одной фразой, то LLM осуществили мечту человечества об общении с машиной как с человеком на обычном человеческом языке, мечту о пресловутом естественном компьютерном интерфейсе.

LLM – это ИИ, которому не нужен интерфейс, потому что он и есть интерфейс. Это делает его доступным миллиардам. Но LLM не просто общаются, они работают с текстом на уровне, сопоставимом с человеком.

ИИ давным-давно умеет классифицировать, оценивать риск, распознавать картинки, диагностировать, решать уравнения, искать закономерности, но не умел говорить с нами на нашем языке. А ведь текст – главный носитель человеческого знания.

Когда появилась система, умеющая понимать текст, взаимодействие с компьютером вдруг вышло за пределы технологий – в культуру, образование, бизнес и коммуникации. А еще LLM впервые объединили доступ к широкому сегменту знаний человечества в одном месте. Экспертные системы ИИ работали с маленькой базой правил, ограниченной отраслью одним типом данных.

LLM же работает с учебниками, статьями, кодом, форумами, историей, бизнес-кейсами, художественными текстами. Впервые LLM стал выглядеть как универсальный помощник. Пусть это иллюзия, но масштаб иллюзий был и остается огромен [3].

Это механизм масштабирования, который с первого взгляда выглядит очень перспективным, а такие очевидные перспективы очень любят инвесторы и корпорации. Революционную роль сыграло и то, что LLM выглядит универсальным инструментом, а именно они захватывают рынки, создают экосистемы и формируют отрасли. Недостатки языковых моделей для неспециалистов выглядят решаемыми.

Если не вникать, LLM создает видимость, что они умнее человека, а это интригует и вызывает желание проверить, так ли они умны. И когда неподготовленные люди кинулись общаться с чат-ботами, им и в самом деле показалось, что они общаются с разумными субъектами.

LLM потенциально стали оружием в руках не только мошенника, но и тех которые ими пользуются. Их ошибки выглядят правдоподобными, и потому модель может дать неправильный медицинский совет, придумать несуществующую юридическую норму, сгенерировать ложный анализ, подделать цитату, убедить человека в неверном выводе.

Выводы. Существуют ли реальные доменные системы ИИ уже сегодня? Можно ли использовать LLM так, чтобы нивелировать его свойства, негодные для профессиональных систем? В принципе можно, но роль LLM в таких системах может оказаться невелика.

Главное, что во многих этих системах, хотя и не во всех, такие революционные языковые модели, если и присутствуют, то являются тем, что они по сути и есть – средством общения на человеческом языке, интерфейсом к знающим, решающим, проверяющим, оценивающим и прочим когнитивным компонентам, существовавшим задолго до генеративных моделей, но сегодня интегрированных в современные ИИ системы как архитектурное ядро.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Яковец, Ю. В. Глобализация и взаимодействие цивилизаций / Ю. В. Яковец; Междунар. ин-т П. Сорокина – Н. Кондратьева. – М.: ЗАО «Изд-во “Экономика”», 2001. – 346 с.
2. Маров, Михаил. 3ds max. Реальная анимация и виртуальная реальность / Михаил Маров. – СПб.: Питер, 2005. – 414 с.
3. 27. Рашевская, М. Компьютерные технологии в дизайне среды / М. Рашевская. – М.: Форум, 2016. – 304 с.

## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ СВЁРТОЧНОГО МЕТОДА ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ИНТЕГРАЛОВ

Концепция свёртки весьма эффективно находит свои приложения, позволяя дать решения ряда задач в замкнутом виде. В работе [1] разработан метод построения композиционных свёрток  $(f * g)$  двух функций  $f$  и  $g$  как операции умножения в некоторой алгебре, когда с помощью действия соответствующего оператора  $A$  на свертку приходят к умножению образов, определенному равенством вида

$$A[f * g] = A[f]A[g]. \quad (1)$$

Если при некоторых условиях имеет смысл обратный оператор от произведения функций, то свёртку можно определить в некотором функциональном пространстве равенством

$$(f * g) = A^{-1}(A[f]A[g]). \quad (2)$$

Наиболее изученные преобразования функции  $f$ , например, преобразования Лапласа, Ханкеля, Стилтеса, Мейера, синус- и косинус-преобразования Фурье и другие преобразования с наиболее общими специальными функциями гипергеометрического типа, которые находят свое успешное применение в различных областях математики, имеют структуру свёртки Меллина, а именно

$$[K](x) = \int_0^{\infty} k\left(\frac{x}{y}\right) f(y) \frac{dy}{y}. \quad (3)$$

Отметим, что наиболее эффективным инструментом для изучения и применения преобразований типа свёртки (3) является равенство Парсеваля

$$\int_0^{\infty} k\left(\frac{x}{y}\right) f(y) \frac{dy}{y} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} k^*(s) f^*(s) x^{-s} ds, \quad (4)$$

где  $k^*(s)$ ,  $f^*(s)$  – преобразование Меллина функций  $k, f$ , определяемое формулой

$$k^*(s) = \int_0^{\infty} k(y) y^{s-1} dy, \quad f^*(s) = \int_0^{\infty} f(y) y^{s-1} dy. \quad (5)$$

Так для ядер гипергеометрического типа [2] справедливо иметь своим преобразованием Меллина (5) отношение произведений гамма-функций от  $s$  на постоянные

$$\prod_{i,j,k,l} \frac{\Gamma(a_i + s)\Gamma(b_j - s)}{\Gamma(c_k + s)\Gamma(d_l - s)},$$

где

$$\Gamma(s) = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{s-1} dy, \quad s > 0, \quad (6)$$

– гамма-функция Эйлера [2], асимптотика которой в соответствии с формулой Стирлинга имеет степенно-экспоненциальный характер. Это, в свою очередь, позволяет изучать в совокупности интегралы и интегральные преобразования в пространствах  $L_p$  со степенно-экспоненциальным весом и получать формулы обращения непосредственно исходя из равенства (4).

В работе [3] разработан метод, позволяющий вычислять определенные интегралы от различных элементарных и специальных функций, которые могут быть приведены к виду (3), где  $k$  и  $f$  – функции, представленные в левых частях строк базовой таблицы преобразования Меллина [3] или в справочнике [4]. Для получения значения  $[K](x)$  этого интеграла достаточно осуществить следующие операции:

1. Перемножить образы  $k^*(s)$ ,  $f^*(s)$  функций  $k$  и  $f$

$$k^*(s)f^*(s) = K^*(s), \quad (7)$$

которые находятся из правых частей соответствующих строк и являются преобразованиями Меллина (6) от оригиналов  $k$  и  $f$ .

2. Для составленного таким образом произведения (7) следует вычислить оригинал  $[K](x)$ , также связанный с  $K^*(s)$  формулой преобразования Меллина (5). Функция  $[K](x)$  выразит искомое значение интеграла.

Оригинал  $[K](x)$  восстанавливается по известному значению своего образа  $K^*(s)$  с помощью теоремы Слейтер (строка 12.38 таблицы §10 [3]), а в более сложных случаях для этого применяется теория вычетов. Функция  $[K](x)$  выражается, вообще говоря, в виде комбинации обобщенных гипергеометрических рядов [2]. Ограничения на параметры, обеспечивающие сходимость исходного интеграла, получаются автоматически из условий существования таких общих  $s$ , для которых оба интеграла преобразования Меллина функций  $k^*(s)$ ,  $f^*(s)$

сходятся.

Пример. Вычислим интеграл

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{x}{y}} y^{v-1} dy = K(x), \quad x > 0. \quad (8)$$

Положим  $k(t) = e^{-t}$ ,  $f(t) = e^{-t} t^v$ . образом первой функции является гамма-функция (6). Образ второй функции

$$f^*(s) = \int_0^{\infty} (e^{-y} y^v) y^{s-1} dy = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{(s+v)-1} dy = \Gamma(s+v), \quad \operatorname{Re}(s+v) > 0.$$

Перемножив эти образы

$$K^*(s) = k^*(s) f^*(s) = \Gamma(s) \Gamma(s+v),$$

найдем прообраз полученного произведения из строки 9.3 (1) §10 [3] через известную функцию Макдональда  $K_\nu(z)$

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{x}{y}} y^{v-1} dy = 2x^{v/2} K_\nu(2\sqrt{x}), \quad x > 0.$$

Интеграл сходится при любом  $v$ , если  $x > 0$ .

Аналогичные методы применимы для свёрток Фурье

$$(f * g)(x) = \int_0^{\infty} f(x-y) g(y) dy.$$

Отметим, что концепция свёртки применима и для дискретных функций и используется в смежных вопросах, связанных с суммированием.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Yakubovich S. B. Index transforms. – Singapore: World Scientific Publishing Company, 1996. 252 p.
2. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. Гипергеометрическая функция. Функции Лежандра. – М., «Наука», 1973. 296 с.
3. Маричев О. И. Метод вычисления интегралов от специальных функций (теория и таблицы формул). – Мн., «Наука и техника», 1978. 312 с.
4. Прудников А.П., Брычков Ю.А., Маричев О.И. Интегралы и ряды. Дополнительные главы. М., «Наука», 1986. 800 с.

В.В. Крахотко, доц., канд. физ.- мат. наук;  
 В.В. Горячкин, доц., канд. физ.-мат. наук (БГУ, г. Минск);  
 В.В. Игнатенко, доц., канд. физ.- мат. наук (БГТУ, г. Минск)

## ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ МНОГОМЕРНОЙ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим распределённую дискретную систему [1] вида

$$\begin{aligned}x(t_1 + 1, t_2, t_3) &= A_1 x(t_1, t_2, t_3) + D_1 y(t_1, t_2, t_3) + B_1 u(t_1, t_2, t_3), \\x(t_1, t_2 + 1, t_3) &= A_2 x(t_1, t_2, t_3) + D_2 y(t_1, t_2, t_3) + B_2 u(t_1, t_2, t_3), \\y(t_1, t_2, t_3 + 1) &= A_3 x(t_1, t_2, t_3) + D_3 y(t_1, t_2, t_3) + B_3 u(t_1, t_2, t_3), \\t_i &\in N \cup \{0\}, i = \overline{1, 3},\end{aligned}$$

(1)

где  $x \in R^n, y \in R^m, u \in R^r, A_i, D_i, B_i, \overline{1, 3}$  – постоянные матрицы соответствующих размеров.

Для системы (1) зададим начальные условия

$$x(0, 0, t_3) = \alpha(t_3), y(t_1, t_2, 0) = \varphi(t_1, t_2), t_i \in N \cup \{0\}, i = \overline{1, 3}. \quad (2)$$

Требуется построить решение системы (1) при начальных условиях (2). Понятно, что при этих начальных условиях решение системы (1) будет неединственным. Если записать решение системы (1) при начальных условиях (2) в явном виде, то приходим к громоздким произведениям и сумме матриц,

задающих систему (1). Поэтому для компактности записи решения системы (1) введем понятие системы определяющих уравнений [2].

Для этого рассмотрим соответствия:

$$x(t_1, t_2, t_3) \rightarrow X_{t_1 t_2 t_3}, y(t_1, t_2, t_3) \rightarrow Y_{t_1 t_2 t_3}, u(t_1, t_2, t_3) \rightarrow U_{t_1 t_2 t_3}, \quad (3)$$

где  $X_{t_1 t_2 t_3} - n \times n$ ,  $Y_{t_1 t_2 t_3} - m \times n$ ,  $U_{t_1 t_2 t_3} - r \times r$  матрицы.

В соответствии с обозначениями (3) построим по системе (1) систему определяющих уравнений

$$\begin{aligned}X_{t_1+1 t_2 t_3} &= A_1 X_{t_1 t_2 t_3} + D_1 Y_{t_1 t_2 t_3} + B_1 U_{t_1 t_2 t_3}, \\X_{t_1 t_2+1 t_3} &= A_2 X_{t_1 t_2 t_3} + D_2 Y_{t_1 t_2 t_3} + B_2 U_{t_1 t_2 t_3}, \\Y_{t_1 t_2 t_3+1} &= A_3 X_{t_1 t_2 t_3} + D_3 Y_{t_1 t_2 t_3} + B_3 U_{t_1 t_2 t_3}, \\t_i &\in Z, i = \overline{1, 3}.\end{aligned} \quad (4)$$

Для построенной системы определяющих уравнений (4) рассмотрим три группы решений при различных начальных условиях:

$$\begin{array}{l}
X_{t_1 t_2 t_3}^{(1)} \left( \begin{array}{l} X_{100} = E_n, X_{0t_2 t_3} = 0, Y_{t_1 t_2 0} = 0, U_{t_1 t_2 t_3} = 0, \forall t_i \in Z, i = \overline{1,3}; \\ Y_{t_1 t_2 t_3}^{(1)} \left( \begin{array}{l} X_{t_1 t_2 t_3} = 0, Y_{t_1 t_2 t_3} = 0, t_i \in Z^- = \{t_i \in Z, t_i < 0, i = \overline{1,3}\} \end{array} \right) \end{array} \right) \\
X_{t_1 t_2 t_3}^{(2)} \left( \begin{array}{l} X_{00t_3} = 0, Y_{001} = E_m, Y_{t_1 t_2 0} = 0, U_{t_1 t_2 t_2} = 0, \forall t_i \in Z, i = \overline{1,3}; \\ Y_{t_1 t_2 t_3}^{(2)} \left( \begin{array}{l} X_{t_1 t_2 t_3} = 0, Y_{t_1 t_2 t_3} = 0, \forall t_i \in Z^-, i = \overline{1,3}. \end{array} \right) \end{array} \right) \\
X_{t_1 t_2 t_3}^{(3)} \left( \begin{array}{l} U_{000} = E_r, U_{t_1 t_2 t_2} = 0, \forall t_i \in Z^-, i = \overline{1,3}; X_{00t_3} = 0, Y_{t_1 t_2 0} = 0, \\ Y_{t_1 t_2 t_3}^{(3)} \left( \begin{array}{l} \forall t_i \in Z, i = \overline{1,3}; X_{t_1 t_2 t_3} = 0, Y_{t_1 t_2 t_2} = 0, t_i \in Z^-, i = \overline{1,3}. \end{array} \right) \end{array} \right)
\end{array}$$

Справедливо утверждение.

Теорема. Если для дискретной системы (1) выполняются следующие условия:

- 1) Матрицы  $A_1$  и  $A_2$  перестановочные;
- 2)  $X_{t_1+1 t_2 t_3}^{(1)} = X_{t_1 t_2+1 t_3}^{(1)}$ ;
- 3)  $X_{t_1+1 t_2 t_3}^{(2)} \varphi(\bar{t}_1 + 1, \bar{t}_2) = X_{t_1 t_2+1 t_3}^{(2)} \varphi(\bar{t}_1, \bar{t}_2 + 1)$ ;
- 4)  $X_{t_1+1 t_2 t_3}^{(3)} u(\bar{t}_1 + 1, \bar{t}_2, \bar{t}_3) = X_{t_1 t_2+1 t_3}^{(3)} u(\bar{t}_1, \bar{t}_2 + 1, \bar{t}_3)$ ,

то существует единственное решение системы (1) с начальными условиями (2) и оно представимо в виде

$$\begin{aligned}
x(t_1, t_2, t_3) = & \sum_{i=0}^{t_3} X_{t_1+1 t_2 i}^{(1)} \alpha(t_3 - i) + \sum_{i=0}^{t_1} \left( \sum_{j=0}^{t_2} - \sum_{j=i+1}^{t_2} \right) X_{t_1-i t_2-j t_3+1}^{(2)} \varphi(i, j) + \\
& + \sum_{i=0}^{t_1} \sum_{j=0}^{t_2-1} \sum_{k=0}^{t_3} X_{t_1-i t_2-j t_3-k}^{(3)} u(i, j, k);
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
y(t_1, t_2, t_3) = & \sum_{i=0}^{t_3} Y_{t_1+1 t_2 t_3-i}^{(1)} \alpha(i) + \sum_{i=0}^{t_1} \left( \sum_{j=0}^{t_2} - \sum_{j=i+1}^{t_2} \right) Y_{i j t_3+1}^{(2)} \varphi(t_1 - i, t_2 - j) + \\
& + \sum_{i=0}^{t_1} \left( \sum_{j=0}^{t_2} - \sum_{j=i+1}^{t_2} \right) Y_{i j t_3-k}^{(3)} u(t_1 - i, t_2 - j, k).
\end{aligned} \tag{6}$$

Доказательство производится непосредственной подстановкой (5), (6) в систему.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гайшун И. В. Системы с дискретным временем. Мн.: Институт математики НАН Беларуси. 2001. – 400 с.
2. Габасов Р., Кириллова Ф.М., Крахотко В.В., Минюк С.А. Теория управляемости линейных дискретных систем. I. Определяющее уравнение. Дифференциальные уравнения. Т. VIII №5, 1972. – С. 767-773.

А.М. Волк, доц., канд. техн. наук;  
С.В. Янович, ст. преп. (БГТУ, г. Минск);  
А.И. Вилькоцкий, доц., канд. техн. наук, вед. инженер  
(НИИСМ, г. Минск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ СУСПЕНЗИИ**

Сахарное производство является одной из отраслей аграрно-промышленного комплекса Беларуси, обладающая значительным экспортным потенциалом. В 2025 году в Беларуси выращено более 5 млн тон сахарной свеклы произведено около 700 тысяч тон сахара белого кристаллического.

Внутренний рынок потребляет 360 тысяч тон сахара. Население ежегодно потребляет порядка 145 тысяч тон. Экспортный потенциал составляет более 300 тысяч тон. Продукция пользуется спросом в России, странах ближнего и дальнего зарубежья, в странах Африки.

Важной составляющей технологической схемы сахарного производства является операция разделения кристаллов сахара и межкристального раствора. Чтобы получить кристаллический сахар, твердую фазу отделяют от жидкой гидромеханическим способом – на центрифугах. Этот процесс называют *центрифугированием* или *центробежным фильтрованием*.

На многих сахарных заводах применяются автоматизированные фильтрующие центрифуги периодического действия с программным управлением и механической выгрузкой сахара.

Цикличность работы, большие нагрузки по току в момент пуска, сложность конструкции систем управления, значительный расход рабочей силы при эксплуатации и ремонте центрифуг и ряд других недостатков свидетельствуют о том, что такие центрифуги не решают проблему полной механизации и автоматизации процесса центрифугирования и не могут полностью соответствовать требованиям современного производства.

Необходимость повышения производительности сахарного производства и возможности автоматизации производственных процессов привела к разработке фильтрующих центрифуг непрерывного действия.

В связи с этим возникла необходимость теоретических исследований динамики движения продуктов в роторе, поиску конструктивных решений и установлению зависимости производительности от геометрических и режимных параметров фильтрующих центрифуг.

При исследовании кинетике осадка исследователями за основу расчета взята материальная точка, что не совсем корректно [1].

Процесс обезвоживания в центрифугах зависит от многих факторов: концентрации твердого вещества, плотности разделяемых фаз, гидродинамических свойств, геометрических параметров, времени нахождения суспензии в рабочей камере аппарата.

Проницаемый конический ротор является основным элементом такого типа центрифуг (рис.)

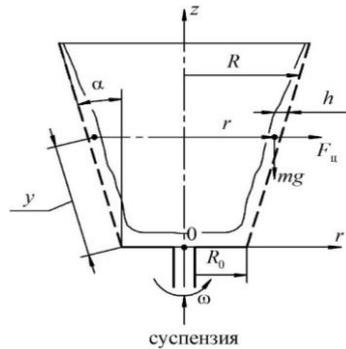


Рисунок – Схема течения суспензии

Процесс обезвоживания суспензии зависит от геометрических параметров ротора, режимов его движения, физических и реологических свойств суспензии, режимов пленочного движения.

В работе [2] рассмотрено стационарное осесимметричное ламинарное движение пленки вязкой жидкости по внутренней стенке вертикального конуса, вращающегося с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Ось  $z$  цилиндрической системы координат направлена вверх по оси конуса (рис.). При малых углах  $\alpha$  наклона образующей конуса к его оси элементарные участки поверхности рассматриваем как цилиндры. При заданном расходе  $Q$  жидкости рассчитан ее удельный расход на

единицу периметра конуса  $q = \frac{Q}{2\pi R}$  и получена величина для толщины

пленки жидкости:

$$h = \sqrt[3]{\frac{6qv}{\omega^2 R \sin \alpha - g \cos \alpha}}. \quad (1)$$

Восходящее течение пленки по конической поверхности будет наблюдаться при выполнении условия:  $\omega^2 R \sin \alpha - g \cos \alpha > 0$ .

Отсюда получаем соотношение:  $\frac{\omega^2 R}{g} > \text{ctg} \alpha$ .

Суспензию будем рассматривать как жидкость с эффективной вязкостью  $\mu$ , зависящей от вязкости несущей среды  $\mu_0$  и объемной концентрации  $c$  частиц твердой фазы.

Для определения эффективной вязкости мало концентрированных суспензий [3] используется формула Эйнштейна:

$$\mu = \mu_0 \left( 1 + \frac{5}{2} c \right), \quad (2)$$

а для концентрации  $c \leq 0,25$  применяется простая формула:

$$\mu = \mu_0 (1 - 2,5c)^{-1}. \quad (3)$$

Изменение объемного расхода суспензии по длине проницаемого конуса определяется локальной скоростью оттока жидкой фазы:

$$\frac{dq}{dy} = -U_0 \quad (U_0 > 0). \quad (4)$$

Скорость оттока жидкости через проницаемый элемент определяется по закону Дарси [4], зависит от перепада давления на стенке, сопротивлений фильтровальной перегородки и образованного осадка:

$$U_0 = \gamma \frac{\Delta P}{\mu(R_{ф.л.} + R_{ос})}. \quad (5)$$

Перепад давления обусловлен нормальными проекциями на коническую поверхность центробежной силы и силы тяжести:

$$\Delta P = \rho h (\omega^2 R \cos \alpha + g \sin \alpha) dy. \quad (6)$$

Идельчиком [5] при обработке экспериментальных данных получена формула зависимости коэффициента расхода  $\gamma$  от относительной площади  $\bar{f}$  отверстий:

$$\gamma^{-2} = \left( 0,707 \sqrt{1 - \bar{f}} + 1 + \bar{f} \right)^2 / \bar{f}^2. \quad (7)$$

Для расчета задается фиксированный шаг изменения длины  $dl$  и на каждом шаге учтем изменение количества жидкости. Из уравнения материального баланса для твердой фазы

$$(c + dc)(q + dq) = cq,$$

ограничившись дифференциалами первого порядка, находим уравнение для изменения концентрации суспензии:

$$\frac{dc}{dy} = -\frac{c}{q} \frac{dq}{dy} = \frac{cU_0}{q}. \quad (8)$$

Концентрация определяет плотность суспензии:

$$\rho = \rho_T c + \rho_{Ж}(1 - c). \quad (9)$$

Полученная математическая модель пленочного обезвоживания суспензии на внутренней поверхности пронизываемого вращающегося конуса позволяет рассчитать режимы движения и другие гидродинамические характеристики в зависимости от геометрических параметров конуса, его частоты вращения и нагрузок по суспензии с учетом ее физических и реологических свойств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чудаков Г. М., Иванов М. Г. Разработка фильтрующих центрифуг // Вестник БГТУ. – 2015.– № 5. – С. 244-269.
2. Волк А. М., Марков В. А., Лютаревич И. А. Пленочное движение вязкой жидкости по внутренней поверхности вращающегося конуса // Труды БГТУ. Серия VI Физико-математические науки и информатика. – Минск, 2005. – Вып. XIII. – С. 35–38.
3. Бувевич Ю. А., Марков В. Г. Континуальная механика монодисперсных суспензий. Реологические уравнения состояния для суспензий умеренной концентрации // Приклад. математика и механика. – 1973. – Т. 37. – Вып. 6. – С. 1059–1077.
4. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: В 2 кн. – М.: Химия, 1981. – 812 с. – Серия «Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии».
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 .

УДК 517.948

С.В. Пономарева, доц., канд. физ.-мат. наук (ГП «Стравита», г. Минск);  
О.Н. Пыжкова, зав. кафедрой, канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск)

#### **О ДРОБНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПОЧТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ОГРАНИЧЕННОЙ $p$ -ВАРИАЦИИ**

Исследуются возможности дробного дифференцирования по Вейлю почти периодических функций ограниченной  $p$ -вариации. Такой класс функций активно исследуется в последнее время в контексте аномальной диффузии, вязкоупругих материалов, управляемых систем с памятью и квазикристаллических сред.

Понятие  $2\pi$ -периодических функций ограниченной  $p$ -вариации ( $p > 0$ ) было введено Винером (см. [1, 2]).

Пусть  $f(t)$  – действительная функция с периодом  $2\pi$ . Обозначим через  $R$  разбиение отрезка  $[0, 2\pi]$  точками  $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = 2\pi$  и положим  $|\kappa| = \max_{1 \leq i \leq n} (t_i - t_{i-1})$  – диаметр разбиения. Будем говорить, что функция  $f(t)$  принадлежит классу  $V_p$  ( $p > 0$ ), т. е. имеет ограниченную  $p$ -вариацию, если

$$V_p^*(f) \equiv \limsup_{\delta \rightarrow +0} \sup_{|\kappa| \leq \delta} \left( \sum_{i=1}^n |f(t_i) - f(t_{i-1})|^p \right)^{\frac{1}{p}} < \infty \quad (1)$$

Нетрудно видеть, что условие (1) эквивалентно следующему:

$$V_p^*(f) \equiv \sup_{\kappa} \left( \sum_{i=1}^n |f(t_i) - f(t_{i-1})|^p \right)^{\frac{1}{p}} < \infty. \quad (2)$$

Заметим, что между классами  $V_p$  очевидно выполняются включения, аналогично включениям лебеговских классов. При  $p = 1$  класс  $V_p$  совпадает с обычным классом функций ограниченной вариации. Если же  $0 < p < 1$ , то всякая функция класса  $V_p$  сингулярна (результат Винера). Поэтому наибольший интерес представляет случай  $1 < p < \infty$ . Функции класса  $V_p$  ( $1 \leq p < \infty$ ), как было показано Винером, могут иметь лишь разрывы первого рода.

Напомним определение дробного интеграла Вейля порядка  $\alpha$  периодической функции с нулевым средним значением по периоду (см., например, [3]):

$$I_{\pm}^{(\alpha)} x = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(t-s) \Psi_{\pm}^{(\alpha)}(s) ds, \quad \alpha > 0, \quad (3)$$

где  $\Psi_{\pm}^{(\alpha)}(t) = 2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{\cos\left(kt \mp \frac{\alpha\pi}{2}\right)}{k^{\alpha}}$ .

Дробная производная Вейля порядка  $0 < \alpha < 1$  для таких же функций определяется равенством

$$D_{\pm}^{(\alpha)} x = \pm \frac{d}{dt} I_{\pm}^{(1-\alpha)} x.$$

В [4] описываются условия, при которых дробная производная Вейля будет сохранять свойство почти периодичности функции. Используется определение Бора почти периодичности функции и для семейств равностепенно почти периодических функций с нулевым

средним значением по почти периоду приводится теорема о дробной производной Вейля:

Теорема 1. Пусть  $x(t)$  – функция, принадлежащая пространству  $L_{ap}$  с нулевым средним значением по почти периоду. Тогда дробная производная по Вейлю порядка  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ )  $D_{\pm}^{(\alpha)}x$  также является почти периодической функцией.

Сделаем попытку ослабить условия на функцию. Рассмотрим почти периодические функции ограниченной  $p$ -вариации (вместо равномерно непрерывных). В [2] показано, что функции класса  $V_p^\alpha$  (функции, производная Вейля порядка  $\alpha$  которых принадлежит классу  $V_p$ ) могут быть приближены в лебеговской метрике  $L_q$  суммами Фурье  $S_n$  с точностью до  $n^{-\alpha-\frac{1}{q}}$  с учетом коэффициента, равного модулю суммы последовательности скачков функции на периоде. Поскольку метрика пространств  $L_q$  не «видит» разницы между функциями, отличающимися значениями на множестве меры нуль, можно рассматривать факторпространство, например, по функциям с нулевой мерой на почти периоде.

Учитывая вышесказанное, свойства интеграла Вейля, возможность непрерывного приближения суммами Фурье рассматриваемых функций, а также [5], можно провести рассуждения, аналогичные [4] для установления утверждения о сохранении свойств почти периодичности для функций ограниченной  $p$ -вариации при дифференцировании по Вейлю:

Теорема 2. Пусть  $x(t)$  – почти периодическая функция ограниченной  $p$ -вариации, принадлежащая пространству  $V_p^\alpha$  с нулевой мерой. Тогда дробная производная по Вейлю порядка  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ )  $D_{\pm}^{(\alpha)}x$  также является почти периодической функцией.

Будет ли всегда сохраняться свойство ограниченной  $p$ -вариации при таком преобразовании? Предположительно, нет в общем случае. Ответ на этот вопрос нам пока неизвестен.

Отметим также, что в определении (3) для рассматриваемых функций  $2\pi$  заменяется на длину почти периода для соответствующего семейства функций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wiener N., The quadratic variation of a function and its Fourier coefficients, Massachusetts J. Math., 3 (1924), 72–94.
2. Б.И. Голубов, О функциях ограниченной  $p$ -вариации, Изв. АН СССР. Сер. матем., 1968, том 32, выпуск 4, 837–858
3. Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О. И. Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. – Минск: Наука и техника, 1987. – 688 с.
4. Пономарева, С.В. Дробная производная Вейля почти периодических функций / С. В. Пономарева, О. Н. Пыжкова // Информационные технологии. Физика и математика: материалы 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 298-301.
5. Левитан Б.М. Почти-периодические функции / Б.М. Левитан. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 396 с.

УДК 517.977

Н.М. Дмитрук, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой  
(БГУ, г. Минск)

### **МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МНОЖЕСТВ УПРАВЛЯЕМОСТИ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ С ВОЗМУЩЕНИЯМИ В КЛАССЕ МНОГОКРАТНО ЗАМЫКАЕМЫХ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ**

1. Рассматривается задача построения множеств управляемости для стационарной линейной системы с возмущениями, т.е. множеств начальных состояний, из которых систему можно перевести с гарантией на заданное терминальное множество за фиксированное время. Задача исследуется в специальном классе управлений – многократно замыкаемых стратегий [1], которые строятся в предположении о том, что в некоторые наперед заданные будущие моменты времени состояние системы с возмущением станет известным, и можно будет построить новое управление на промежутке до поступления следующего измерения состояния. Кроме того, исследуется задача построения множеств управляемости, все состояния обеспечивают гарантированное значение линейного терминального критерия качества не хуже некоторого заданного.

2. Рассмотрим линейную дискретную систему

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Mw(t), \quad t = 0, 1, \dots, T-1, \quad (1)$$

где  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^r$ ,  $w(t) \in R^p$  – состояние, управление, неизвестное возмущение в момент времени  $t$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $M$  – заданные матрицы соответствующего размера.

На состояния, управления и возмущения наложены ограничения:

$$x(T) \in X_T, u(t) \in U, w(t) \in W, t = 0, 1, \dots, T-1, \quad (2)$$

где  $X_T = \{x \in R^n : Hx \leq g\}$ ,  $H \in R^{m \times n}$ ,  $g \in R^m$ ,  
 $U = \{u \in R^r : u_{\min} \leq u \leq u_{\max}\}$ ,  $W = \{w \in R^p : \|w\|_{\infty} \leq w_{\max}\}$ .

Определим многократно замыкаемую стратегию управления [1]. Пусть до начала процесса управления зафиксированы  $N$  моментов замыкания  $0 < T_1 < \dots < T_N < T$ . Они разбивают интервал управления на промежутки  $\Delta_j = \{T_j, T_j + 1, \dots, T_{j+1} - 1\}$ ,  $j=0, 1, \dots, N$ , где  $T_0 = 0$ ,  $T_{N+1} = T$ .

Управление на  $\Delta_j$  будем обозначать  $u_j(\cdot) = (u_j(t), t \in \Delta_j)$ , возмущение –  $w_j(\cdot) = (w_j(t), t \in \Delta_j)$ , множества доступных на  $\Delta_j$  управлений обозначим  $U_j$ , возможных возмущений –  $W_j$ . Состояние системы (1) в момент времени  $t \in \Delta_j$  при начальном состоянии  $x(T_j) = x_j$ , управлении  $u_j(\cdot)$  и возмущении  $w_j(\cdot)$  будем обозначать  $x(t | x_j, u_j, w_j)$ . Множество возможных состояний в момент  $T_{j+1}$  обозначим  $X(T_{j+1} | x_j, u_j)$ .

Сделаем предположение: в каждый момент  $T_j, j=1, \dots, N$ , можно:

- 1) точно измерить текущее состояние  $x^*(T_j) \in X(T_j | x_{j-1}, u_{j-1})$  системы;
- 2) в зависимости от  $x^*(T_j)$  выбрать новое управление  $u_j(\cdot | x^*(T_j)) \in U_j$ .

Поскольку состояния  $x^*(T_j)$ , заранее не известны, определим стратегии управления как функции произвольных позиций процесса управления  $(T_j, x_j), j = 1, \dots, N$ .

**Определение 1.** Для позиции  $(T_j, x_j), j = N-1, \dots, 0$ , стратегией с  $N-j$  моментами замыкания  $T_{j+1}, \dots, T_N$  назовем совокупность

$$\pi_{N-j}(T_j, x_j) = \{u_j(\cdot | x_j); \pi_{N-j-1}(T_{j+1}, x_{j+1}), x_{j+1} \in X(T_{j+1} | x_j, u_j)\}, \quad (3)$$

состоящую из управления  $u_j(\cdot | x_j) \in U_j$  на  $\Delta_j$  и семейства стратегий  $\pi_{N-j-1}(T_{j+1}, x_{j+1})$  с  $N-j-1$  моментами замыкания, определенных для всех возможных состояний  $x_{j+1} \in X(T_{j+1} | x_j, u_j)$ . Здесь считается, что стратегия  $\pi_0(T_N, x_N)$  совпадает с управлением  $u_N(\cdot | x_N) \in U_N$ .

**Определение 2.** Управление  $u_j(\cdot | x_j)$  в (3) будем называть начальной программой (на  $\Delta_j$  для состояния  $x_j$ ).

Траекторию системы (1) с начальным состоянием  $x(0) = x_0$ , соответствующую стратегии  $\pi_N(0, x_0)$  и возмущению  $w(\cdot) = (w_0(\cdot), \dots, w_N(\cdot))$ , будем обозначать  $x(t | x_0, \pi_N, w)$ ,  $t = 0, 1, \dots, T-1$ , и определять как последовательное решение систем

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu_0(t | x_0) + Mw_0(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in \Delta_0,$$

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu_j(t | x(T_j)) + Mw_j(t),$$

$$x(T_j) = x(T_j | x(T_{j-1}), u_{j-1}, w_{j-1}), \quad t \in \Delta_j, \quad j = 1, \dots, N.$$

Для позиции  $(T_j, x_j)$ ,  $j = 1, \dots, N$ , траектория  $x(t | x_j, \pi_{N-j}, w)$ ,  $t = T_j, \dots, T$ , определяется аналогично.

**Определение 3.** Для позиции  $(T_j, x_j)$ ,  $j = 1, \dots, N$ , стратегия управления  $\pi_{N-j}(T_j, x_j)$  называется допустимой, если  $x(T | x_j, \pi_{N-j}, w) \in X_T \quad \forall w(t) \in W, \quad t = T_j, \dots, T-1$ .

**Определение 4.** Множеством управляемости системы (1) при ограничениях (2) в классе стратегий управления (3) в момент  $T_j$  назовем совокупность всех состояний  $x_j$  для которых найдется допустимая стратегия  $\pi_{N-j}(T_j, x_j)$ .

3. Введем множества:  $X_{N+1} := X_T$ ,

$$X_j := \{x_j \in R^n : \exists u_j(\cdot | x_j) \in U_j, X(T_{j+1} | x_j, u_j) \subset X_{j+1}\}, \quad j = N, \dots, 0,$$

(4)

т.е. каждое множество  $X_j$  составим из всех точек  $x_j$ , для которых существует управление  $u_j(\cdot | x_j) \in U_j$ , переводящее систему (1) с гарантией на следующее множество  $X_{j+1}$ .

**Лемма 1.** Для позиции  $(T_j, x_j)$ ,  $j = N, \dots, 0$ , стратегия  $\pi_{N-j}(T_j, x_j)$  с  $N-j$  моментами замыкания  $T_{j+1}, \dots, T_N$  допустима, если ее начальная программа  $u_j(\cdot | x_j) \in U_j$  удовлетворяет условию

$$X(T_{j+1} | x_j, u_j) \subset X_{j+1}.$$

Таким образом, каждое множество  $X_j$  вида (4) есть множество управляемых с гарантией на терминальное множество  $X_T$  состояний системы (1) в момент  $T_j$  в классе стратегий управления с  $N-j$  моментами замыкания  $T_{j+1}, \dots, T_N$ , т.е. искомое множество управляемости.

4. Нас будет интересовать также построение множеств управляемости, для точек которых найдется стратегия управления, обеспечивающая гарантированное значение некоторого терминального критерия качества не более наперед заданного значения  $\alpha$ . Пусть такой критерий имеет вид  $c'x(T)$ , где  $c \in R^n$ .

**Определение 5.** Для позиции  $(T_j, x_j)$ ,  $j = 1, \dots, N$ , допустимая стратегия управления  $\pi_{N-j}^0(T_j, x_j)$  называется оптимальной, если  $\pi_{N-j}^0(T_j, x_j) = \arg \min_{\pi} \max_w c'x(T | x_j, \pi_{N-j}, w)$ .

Применяя рассуждения динамического программирования, можно установить справедливость следующей леммы.

**Лемма 2.** Для позиции  $(T_j, x_j)$ ,  $j = N, \dots, 0$ , допустимая стратегия  $\pi_{N-j}^0(T_j, x_j)$  с  $N - j$  моментами замыкания  $T_{j+1}, \dots, T_N$  оптимальна, если ее начальная программа  $u_j^0(\cdot | x_j) \in U_j$  находится как решение задачи

$$V_j(x_j) = \min_{u_j \in U_j} \max_{w_j \in W_j} V_{j+1}(x(T_{j+1} | x_j, u_j, w_j)). \quad (5)$$

Уравнение (5),  $x_j \in X_j, j=0, 1, \dots, N$ , есть уравнение Беллмана.

Пусть задано некоторое значение  $\alpha \in R$ . Введем множества

$$X_j(\alpha) := \{x \in R^n : V_j(x) \leq \alpha\}, j=0, 1, \dots, N. \quad (6)$$

По построению, множество  $X_j(\alpha)$  вида (6) есть множество управляемых с гарантией на терминальное множество  $X_T$  состояний системы (1) в момент  $T_j$  в классе стратегий управления с  $N - j$  моментами замыкания  $T_{j+1}, \dots, T_N$ , для которых гарантировано значение критерия качества, не превосходящее заданного  $\alpha$ . Центральный результат работы – описание множеств (6) в зависимости от параметра  $\alpha$ .

**Теорема 1.** Пусть для выбранных моментов замыкания  $T_1, \dots, T_N$  не пусто множество  $X_1$ . Тогда для любого  $j=0, 1, \dots, N$  множество  $X_j(\alpha)$  (в том случае, если оно не пусто при выбранном значении  $\alpha$ ) является выпуклым многогранником вида

$$X_j(\alpha) = \{x \in R^n : P_j x \leq g_j + \lambda_j \alpha\}, \quad (9)$$

где  $P_j \in R^{m_j \times n}$ ,  $g_j, \lambda_j \in R^{m_j}$  вычисляются рекуррентно по правилам

$$P_j := Y_j P_{j+1} A^{T_{j+1}-T_j}, \lambda_j := Y_j \lambda_{j+1} \geq 0,$$

$$g_j := Y_j (g_{j+1} - \gamma_j) - \sum_{t \in \Delta_j} P_{j+1} A^{T_j-t-1} B u_{\min} + \sum_{t \in \Delta_j} V_j(t) (u_{\max} - u_{\min}),$$

$$P_{N+1} := \begin{pmatrix} H \\ c' \end{pmatrix}, g_{N+1} := \begin{pmatrix} g \\ 0 \end{pmatrix}, \lambda_{N+1} := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \gamma_j := w_{\max} \sum_{t \in \Delta_j} \| P_{j+1} A^{T_{j+1}-t-1} M \|_1$$

и строки матриц  $Y_j \in R^{m_j \times m_{j+1}}$ ,  $V_j(t) \in R^{m_j \times r}$ ,  $t \in \Delta_j$ , образуют фундаментальную систему решений неравенств

$$\left( P_{j+1} A^{T_{j+1}-t-1} B \right)' y_j + v_j(t) \geq 0, t \in \Delta_j, y_j \geq 0, v_j(t) \geq 0, t \in \Delta_j.$$

Представления (9) играют значительную роль при построении оптимальных стратегий управления и позволяют сводить задачи вида (5) к задачам линейного программирования [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитрук, Н.М. Многократно замыкаемая стратегия управления в линейной терминальной задаче оптимального гарантированного управления / Н.М. Дмитрук // Труды Института математики и механики УрО РАН. – 2022. – Т.28, №3. – С. 66-82.

УДК 536.24

Т.Б. Карлович, доц., канд. физ.-мат. наук,  
А.Л. Наркевич, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

### ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ТРЕНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ ВОЛЧКА ТИП-ТОП ПО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЕГО АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ЗАПУСКЕ

Волчок тип-топ – это устройство, способное переворачиваться на  $180^\circ$  во время своего движения по горизонтальной поверхности за счет действия силы трения. При этом сухое трение волчка о плоскость в случае его быстрого вращения можно заменить моделью вязкого трения [1], описываемого формулой

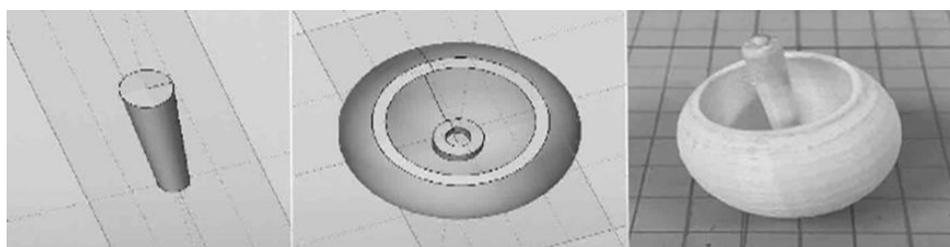
$$F = -\mu u, \quad (1)$$

где  $F$  – сила трения скольжения;  $\mu$  – коэффициент вязкого трения скольжения;  $u$  – скорость точки касания волчка горизонтальной плоскости.

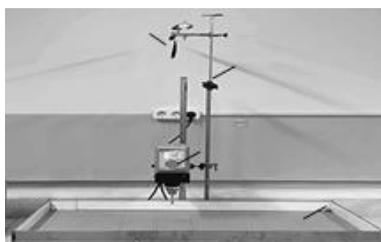
Теоретическое описание движения волчка тип-топ на основе численных и аналитических решений нелинейных динамических уравнений с использованием формулы (1) представлено в работах [2,

3]. Однако в этих решениях отсутствует определение минимального значения силы трения, начиная с которого возможен переворот волчка на  $180^\circ$ . В настоящей работе существование нижнего порогового значения силы трения будет продемонстрировано экспериментально с использованием волчка, распечатанного из полилактида на 3D-принтере. 3D-модели элементов и фото волчка представлены на рис. 1.

Волчок состоит из сферической оболочки толщиной 1 мм и диаметром 38 мм, срезанной на  $\frac{1}{4}$  часть, и ножки в виде усеченного конуса с меньшим диаметром 3 мм и большим диаметром 6 мм по торцам, которая вставляется в цилиндрическое отверстие в шляпке (рис. 1).



**Рисунок 1 – 3D-модели элементов и фото волчка:**  
*а* – 3D-модель ножки, *б* – 3D-модель сферической оболочки, *в* – фото волчка



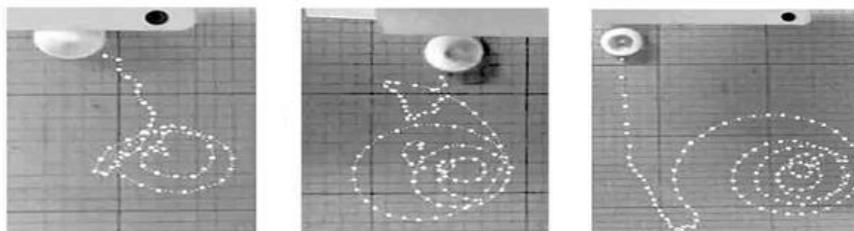
**Рисунок 2 – Экспериментальная установка**

Для автоматизированного запуска волчка используется устройство с полым ротором электродвигателя *1* рис. 2, в котором закрепляется цилиндрическая трубка длиной 0,3 м и внутренним диаметром 6 мм. Волчок ножкой вставляется в нижний конец трубки и раскручивается до требуемой скорости, а затем выталкивается на горизонтальную поверхность алюминиевого манежа *2* размером 0,6×0,9 м, покрытого порошковой краской и расчерченного графитовым грифелем на квадраты размером 10×10 мм. В качестве толкателя используется вязальная проволока диаметром 1 мм и длиной 0,4 м. Бортики манежа высотой 60 мм с внутренней стороны обкладываются макетным картоном для смягчения ударов волчка о них. Движение волчка записывается при помощи видеокамеры смартфона (не показан), зафиксированного в селфи-палке *3*, прикрепленной к штативу *4*.

Примеры траекторий при различных скоростях раскручивания волчка приведены на рис. 3а, 3б, 3в. Крупные белые точки соответ-

ствуют положению точки касания волчка поверхности манежа в данный момент времени, мелкие белые точки – это аппроксимация участка траектории движения волчка, которая не попала в кадр видеосъемки. Из всех траекторий видно, что переворот волчка происходит почти мгновенно после начала движения по плоскости манежа (точки *A*), затем волчок начинает петлять (область *B*), разворачиваясь почти на  $180^\circ$  в горизонтальной плоскости, причем форма петли существенно зависит от скорости раскручивания волчка. Так при скорости 2000 об/мин. петля имеет вытянутую форму (рис. 3а), при скорости 2500 об/мин. петля принимает форму неправильного треугольника (рис. 3б), а при скорости 3000 об/мин. наблюдается П-образный отрезок траектории (рис. 3в). После петлеобразного движения следует движение по скручивающейся спирали, параметры которой зависят от скорости раскручивания волчка: с ее ростом увеличивается максимальный радиус закручивания спирали и число ее витков (для скорости 2000 об/мин. максимальный радиус составляет 30 мм, число витков – 2, для скорости 2500 об/мин. максимальный радиус – 50 мм, число витков – 3, для скорости 3000 об/мин. – максимальный радиус – 80 мм, число витков – 4).

Когда радиус скручивающейся спирали становится малым, начинается последний этап движения волчка – обратный переворот с ножки на шляпку (точка *C*) и движение по раскручивающейся спирали (отрезок траектории *CD* на рис. 3б). В отличие от траекторий с ручным раскручиванием волчка, описанных в работе [4], для всех траекторий движения волчка с автоматизированным раскручиванием характерен короткий начальный этап движения на шляпке до переворота на ножку, длинный период вращения на ножке и короткий этап движения после обратного переворота на шляпку.



**Рисунок 3 – Траектории движения волчка при различных скоростях вращения ротора раскручивающего устройства:  
*a* – 2000 об/мин, *б* – 2500 об/мин, *в* – 3000 об/мин.**

**На траекториях точка *A* соответствует точке переворота волчка с шляпки на ножку, область *B* – петлеобразному движению, точка *C* – обратному перевороту волчка с ножки на шляпку**

В первоначальных опытах с волчком тип-топ до нанесения разметки грифелем на поверхность манежа он начинал переворачиваться при скорости раскручивания 2000 об/мин. После нанесения разметки

волчок перестал переворачиваться даже при раскрутке со скоростью 3000 об/мин. Этот эффект можно объяснить уменьшением шероховатости поверхности из-за присутствия графита (эффект «графитовой смазки») и, соответственно, уменьшением коэффициента трения. Далее поверхность шляпки волчка зачищалась шлифовальной шкуркой с зернистостью Р400. После обработки шкуркой волчок вновь приобретал способность переворачиваться на ножку в течение нескольких запусков. Потом способность к перевороту опять исчезала из-за истирания поверхности волчка и налипания на нее частиц графита, и требовалась повторная обработка шкуркой для придания волчку требуемой шероховатости поверхности. Можно сделать вывод, что существует нижнее пороговое значение шероховатости взаимодействующих поверхностей (и коэффициента трения между поверхностями манежа и волчка соответственно), начиная с которого возможен переворот при движении волчка по горизонтальной поверхности.

В работе [5] подобный эффект наблюдался при ручном раскручивании волчка. В ней результат «неудачного» запуска волчка без переворота связывался с недостаточной начальной скоростью раскручивания, а следовательно, и с недостаточной скоростью  $u$ , которая в свою очередь пропорциональна силе трения согласно формуле (1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Журавлев В. Ф. О модели сухого трения в задаче качения твердых тел // ПММ. 1998. Т. 62, вып. 5, С. 762–767.

2. Маркеев А.П. К динамике волчка // Изв. АН СССР. Механ. тв. тела. – 1984. № 3. С. 30-38.

3. Карапетян А.В. Глобальный качественный анализ динамики китайского волчка (тип-топ) // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2008. Т. 43, № 3. С. 33-41.

4. Карлович Т. Б., Васеха А. П., Ласовский Р. Н. Экспериментальное исследование траектории точки касания волчка тип-топ с горизонтальной поверхностью при его движении // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 2(284). С.19–24

5. Карлович Т. Б., Ласовский Р. Н. Исследование кинетических характеристик волчка tip-top с горизонтальной поверхностью при его движении // Информационные технологии: материалы докл. 88-й науч.-техн. конф. проф.-преподавательского состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 29 января – 16 февраля 2024 г. [Электронный ресурс]. Минск: БГТУ, 2024. С. 243–246. URL:

<https://elib.belstu.by/bitstream/123456789/67770/1/3.%20Карлович.pdf>  
(дата обращения: 14.11.2025).

## ОБ ОДНОЙ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ПРИСТРЕЛКИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ГРАНИЧНЫХ ЗАДАЧ С ПОГРАНИЧНЫМ СЛОЕМ

Граничные задачи с пограничным слоем относятся к области гидродинамики и аэродинамики, где изучается поведение жидкости или газа вблизи поверхности тела. Пограничный слой — это тонкий слой жидкости или газа рядом с поверхностью, где скорость течения изменяется от нуля до значения, соответствующего основному потоку.

При малом параметре  $\varepsilon > 0$  решение может испытывать резкие изменения вблизи границ области, что приводит к возникновению пограничного слоя, расположенного вблизи границ интервала, где решение, а особенно градиент решения, неограниченно растет, в то время как во внутренней области решение изменяется достаточно плавно. В случае нелинейных уравнений граничные задачи с пограничным слоем и малым параметром  $\varepsilon > 0$  при старшей производной имеют вид:

$$\begin{cases} y_1' = y_2, \\ \varepsilon y_2' = f(x, y_1, y_2), 0 \leq x \leq 1. \end{cases} \quad (1)$$

$$y_1(0) = A, \quad y_1(1) = B. \quad (2)$$

При удачных начальных приближениях  $y_1^{(0)}(x)$ ,  $y_2^{(0)}(x)$  к решению этой задачи, жестких ограничениях на гладкость  $f$  и порядок её роста по переменной  $y_2$ , возможна линеаризация задачи (1)–(2) и сходимость метода Ньютона – Канторовича. Исходя из свойств матрицы Якоби для правой части системы уравнений (1)

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial f(P^{(0)})}{\partial y_1} & \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial f(P^{(0)})}{\partial y_2} \end{bmatrix}, \quad P^{(0)} = (x, y_1^{(0)}(x), y_2^{(0)}(x))$$

можно построить разностные схемы экспоненциальной подгонки для соответствующей линеаризованной задачи.

В этом случае для решения и анализа решения задачи (1)–(2) роль начального приближения очень важна. Удачно найти начальное приближение  $y_1^{(0)}(x)$ ,  $y_2^{(0)}(x)$  для задачи с пограничными или внутренними переходными слоями практически невозможно. Поэтому предлагается модификация метода пристрелки, с помощью которой можно получить решение данной задачи.

Рассмотрим систему нелинейных уравнений первого порядка с малым параметром при старшей производной, приведенную к нормализованному виду:

$$y' = f(t, y, \varepsilon), \quad a \leq t \leq b, \quad (3)$$

где

$$y: [a, b] \rightarrow R^n, \quad f: [a, b] \times R^n \times R \rightarrow R^n, \quad \varepsilon > 0$$

Зависимость  $f$  от  $\varepsilon$  такова, что в соответствующих граничных задачах будут возникать пограничные или внутренние переходные слои.

К последнему уравнению (3) присоединим двухточечное граничное условие наиболее общего вида:

$$g(y(a), y(b)) = 0, \quad (4)$$

где  $g: R^n \times R^n \rightarrow R$ .

В наиболее сложных случаях, когда решение характеризуется внутренними переходными слоями, резкими перепадами, и даже разрывами первого рода, модификацию метода пристрелки можно построить таким образом, чтобы она могла адаптироваться к выявляемым в процессе вычислительного эксперимента свойствам решения и обладала бы необходимой для этого гибкостью. Для этого предлагается метод множественной двусторонней пристрелки. В нем имеется возможность выбора точек и параметров пристрелки, выбора точек сшива решений, длин положительных  $J_{2j-1}^{(+)}$  и отрицательных  $J_{2j-1}^{(-)}$  подынтервалов пристрелки для создания необходимых условий качественного численного моделирования траектории искомого решения. Переходим от исходной граничной задачи к совокупности задач Коши, в том числе и жестких, для численного решения которых существуют хорошо работающие методы.

Приведем формулы для реализации этого метода.

$$\text{Имеем: } \begin{cases} u' = f(t, u), & t \in J_{2j-1}^{(+)} = \{t_{2j-1} \leq t \leq t_{2j}\}, \\ u(t, y_{2j-1})|_{t=t_{2j-1}} = y_{2j-1}, & y_{2j-1} \in R^n, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v' = f(t, v), & t \in J_{2j-1}^{(-)} = \{t_{2j-1} \geq t \geq t_{2j-2}\}, \\ v(t, y_{2j-1})|_{t=t_{2j-1}} = y_{2j-1}, & y_j \in R^n, \quad j = \overline{1, m} \end{cases} \quad (6)$$

$$a = t_0 < t_1 < t_2 \dots < t_{2m-2} < t_{2m-1} < t_{2m} = b.$$

$t_{2j-1}$  – точки пристрелки,  $t_{2j}$  – точки сшива решений,  $y_{2j-1}$  – параметры пристрелки. Параметры пристрелки определяются, как решения замыкающей системы вида:

$$\begin{cases} u(t_{2j}, y_{2j-1}) - v(t_{2j}, y_{2j+1}) = 0, & j = \overline{0, m-1}, \\ g(v(t_0, y_1), u(t_{2m}, y_{2m-1})) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Свойства замыкающей системы (7) зависят от ее правой части  $f$ , исходного уравнения, формы граничных условий, области интегрирования  $[a, b]$ , точек пристрелки  $u(t, y_{2j-1})$  и траекторий пристрелки  $u(t, y_{2j-1}), v(t, y_{2j-1})$ . Эти свойства наиболее полно характеризуются матрицами Якоби для соответствующих отображений  $H$ .

Перепишем замыкающую систему в операторной форме:

$$H(z^*) = 0, \quad (8)$$

$$H: R^N \rightarrow R^N, \quad N = mn, \quad (9)$$

где

$$z^* = (y_1^T, y_3^T, \dots, y_{2m-1}^T)^T.$$

$z^*$  – искомое решение замыкающей системы (7). В этом случае само решение  $y(t)$  представим формулой

$$y(t) = \begin{cases} v(t, y_{2j-1}), & t \in J_{2j-1}^{(-)}, \\ u(t, y_{2j-1}), & t \in J_{2j-1}^{(+)}, \quad j = \overline{1, m} \end{cases} \quad (10)$$

Составим матрицу Якоби для замыкающей системы  $H(z^*) = 0$ , записанной в операторной форме.

$$\frac{\partial H(z)}{\partial z} = \begin{bmatrix} U_1^{(2)} & -V_3^{(2)} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & U_3^{(4)} & -V_5^{(4)} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & U_{2m-3}^{(2m-2)} & -V_{2m-1}^{(2m-2)} \\ G_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & G_{2m-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Для изучения свойств матрицы Якоби (11), нужно описать ее блоки. Это, в частности, даст условие ее разрешимости. Система имеет блочный вид. В первых  $m-1$  блочных строк она двухдиагональна. В последней блочной строке ненулевыми являются только матрицы, стоящие на первом и последнем местах.

Для решения замыкающей системы (8) используется метод Ньютона.

$$1. \quad \frac{\partial H(z^{(k)})}{\partial z} \Delta z^{(k)} = -H(z^{(k)}). \quad (12)$$

$$2. \quad z^{(k+1)} = z^{(k)} + \Delta z^{(k)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

$$\text{где } z^{(k)} = (\Delta z_1^{(k)T}, \Delta z_3^{(k)T}, \dots, \Delta z_{2m-1}^{(k)T})^T; \quad H = (h_1^{(k)}, h_2^{(k)} \dots h_m^{(k)})^T,$$

$$h_i^{(k)} = h_i(z^{(k)}).$$

Замыкающая система однозначно разрешима. Ее порядок определяется числом точек пристрелки, и он останется неизменным, и не будет зависеть от того, какая сетка будет использоваться на положительных и отрицательных подынтервалах пристрелки при численном интегрировании пристрелочных задач Коши.

3. Если локализация начального приближения  $z^{(0)}$  выполнена с достаточной точностью и  $\det \frac{\partial H(z^{(k)})}{\partial z} \neq 0$  в точке  $z = z^*$  и некоторой ее окрестности, то последовательность  $\{z^{(k)}\}_0^\infty$  сходится.

Практическая реализация данного метода зависит от выбора подынтервалов пристрелки  $J_{2j-1}^{(+)}$  и  $J_{2j-1}^{(-)}$ , определения их длин и параметров с учетом свойств замыкающей системы уравнений и оптимизации ее по числу уравнений, определения пристрелочных траектории и организации итерационных процессов.

УДК 535.34+535.35+535.372

Н.Н. Крук, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой (БГТУ, г. Минск);  
Д.В. Петрова, канд. хим. наук, науч. сотр.,  
(Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия);  
Л.Л. Гладков, -р физ.-мат. наук, проф., (БГАС, г. Минск);  
Д.В. Кленицкий, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск);  
А.А. Слиж, студ., (БГТУ, г. Минск).

### **ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНОСТИ МАКРОЦИКЛА И АРХИТЕКТУРЫ ПЕРИФЕРИЧЕСКОГО ЗАМЕЩЕНИЯ АЛКИЛИРОВАННЫХ КОРРОЛОВ**

Корролы являются представителями семейства сокращенных тетрапиррольных соединений, в макроцикле которых отсутствует один метиновый мостик, а пара соседних пиррольных колец соединена связью  $C_a-C_a$ . Сокращенный макроцикл коррола сохраняет свой ароматический характер благодаря тому, что макроциклическое кольцо содержит три пиррольных и одно пирролениновое кольцо, в отличие от макроцикла порфиринового свободного основания, который состоит из двух пиррольных и двух пирролениновых колец. Характерной особенностью свободных оснований корролов является сосуществование NH-таутомеров из-за различного расположения трех протонов в ядре макроцикла (Рис. 1). Каждый из NH-таутомеров обладает своими уникальными свойствами благодаря асимметрии мак-

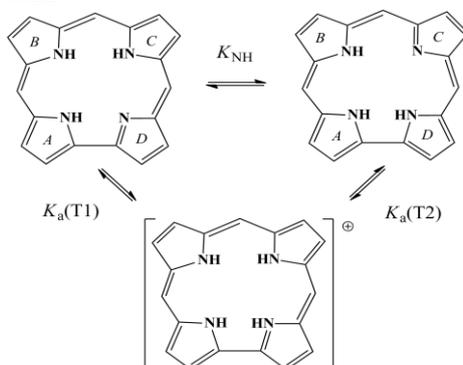
роцикла. Число таутомеров зависит от архитектуры замещения: при замещении пар *A, B* и *C, D* пиррольных колец, а также промежуточного метинового мостика равномерно наблюдаются два NH-таутомера, в случае асимметричного замещения могут образовываться четыре NH-таутомера.

Размер ядра макроцикла слишком мал для трех протонов, поэтому стерические препятствия в ядре выталкивают протоны из средней плоскости макроцикла с образованием сильно неплоской конформации макроцикла. Молекулярная подвижность дипиррометенов (кольца *B, C*) и дипирролов (кольца *A, D*) различна, что приводит к различиям в молекулярной структуре таутомеров, в которых два протона NH располагаются либо на дипиррометеновом (как правило, это длинноволновый таутомер T1), либо на дипиррольном фрагменте (коротковолновой таутомер T2). Одним из наиболее заметных структурных изменений при образовании неплоских конформеров является наклон пиррольных/пирролениновых колец относительно средней плоскости макроцикла. Считается, что наклон колец облегчает межмолекулярные взаимодействия в сольватной оболочке и способствует изменениям основных и кислотных свойств ядра макроцикла. Электронная структура и степень неплоских искажений макроцикла модулируются стерическими и электронными взаимодействиями атомов макроцикла с заместителями. Таким образом, выбирая соответствующую архитектуру замещения, можно модулировать кислотно-основные равновесия для каждого из NH-таутомеров.

Макроцикл каждого из NH-таутомер обладает своим собственным контуром  $\pi$ -сопряжения, и разница в контуре  $\pi$ -сопряжения для таутомеров может быть использована для смещения равновесия между таутомерами. Если архитектура замещения имитирует распределение электронной плотности, напоминающее распределение электронной плотности для данного NH-таутомера, равновесие NH-таутомеров смещается в сторону стабилизации этого таутомера. NH-таутомеры могут легко переходить друг в друга как в основном, так и в возбужденном состояниях. Таким образом, из-за NH-таутомеризации необходимо рассматривать сопряженную схему NH-таутомерного и кислотно-основных равновесий (Рис.1).

Корролы, замещенные по  $S_b$ -положениям пиррольных колец, описаны как первые производные коррола, однако, им уделено гораздо меньше внимания по сравнению с корролами, замещенными по  $S_m$ -положениям. Причина заключается в существенно меньшем выходе продукта в результате синтеза. Недавние достижения в синтетической химии вывели  $S_b$ -замещенные (чаще всего, алкилированные) корролы в число молекул, представляющих практический интерес. Известно,

что замещение  $C_b$  и  $C_m$  положений тетрапиррольного макроцикла приводит к образованию двух групп производных, которые сохраняют свои специфические физико-химические и спектрально-люминесцентные свойства благодаря различным моделям влияния на молекулярные орбитали.



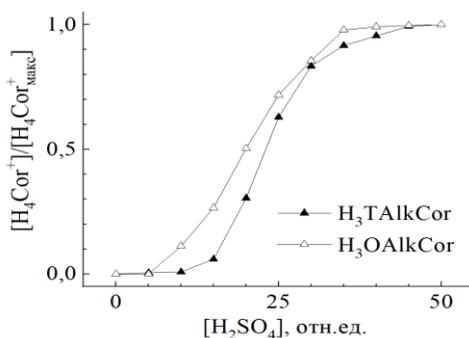
**Рисунок 1 – Схема кислотно-основных равновесий в растворе между равновесной системой двух NH-таутомеров и протонированной формой коррола в основном состоянии**

Это справедливо для таутомеров NH свободных оснований корролов, особенности спектров поглощения основного состояния которых были недавно выявлены и сравнены [1]. Обнаружено, что электронная структура и молекулярная конформация протонированных форм корролов также изменяются при изменении архитектуры замещения. Так, в  $C_b$ -алкилированном корроле молекулярные орбитали НОМО и НОМО–1 почти вырождены, что усиливает конфигурационное взаимодействие и уменьшает силу осциллятора длинноволновой  $Q_x$  полосы. Напротив, энергетический зазор НОМО–НОМО–1 в  $C_m$ -арил-корролах увеличивается, что приводит к росту поглощению  $Q_x$  полосы.

Размер ядра макроцикла и углы наклона пиррола в  $C_b$ -алкилированных корролах изменяются в зависимости от архитектуры замещения. Было обнаружено, что наличие/отсутствие стерических препятствий в дипиррольном фрагменте макроцикла, когда водороды атомов углерода C2 и C18 замещены/не замещены (объемными) группами, приводит к длине связи C1–C19. Изменение длины связи, в свою очередь, вызывает изменения размера ядра макроцикла и приводит к изменению характера наклона пиррольного кольца.

В настоящей работе нами изучены процессы протонирования ядра в алкилированных корролах с различной архитектурой замещения с использованием квантово-химических расчетов методом функционала плотности и методов молекулярной спектроскопии. В качестве объектов исследования использовали корролы с различной локализацией стерических взаимодействий на периферии макроцикла: у одного восемь алкильных заместителей присоединены к  $C_b$ -

положениях всех четырех пиррольных колец ( $H_3OAlkCor$ ), а у другого четыре алкильные группы расположены в  $S_b$ -положениях дипиррометенового фрагмента ( $H_3TAlkCor$ ). Установлено, что различная архитектура периферического замещения в дипиррольном фрагменте двух алкилированных корролов определяет разницу в характере и величине неплоских искажений свободного основания тетрапиррольного макроцикла. Таутомеры Т1 двух исследованных корролов демонстрируют неплоское искажение макроцикла волнового типа, при этом параметр отклонений атомов скелета от средней плоскости макроцикла  $\Delta 23$  значительно больше для  $H_3TAlkCor$  по сравнению с  $H_3OAlkCor$ . Величина параметра отклонения средней плоскости  $\Delta 23$  для таутомеров Т2 исследуемых корролов практически не различается, однако тип неплоской деформации макроцикла, определенный с помощью анализа диаграмм Эшенмозера, оказался различным: волнообразный для  $H_3TAlkCor$  и седлообразный для  $H_3OAlkCor$ .



**Рисунок 2 – Кривые спектрофотометрического титрования исследованных корролов**

Угол наклона пирроленинового кольца относительно средней плоскости макроцикла был заметно выше для  $H_3TAlkCor$ , что объясняется уменьшением размера ядра макроцикла, когда длина связи  $C_1-C_{19}$  имеет тенденцию к укорочению при отсутствии  $S_b$ -заместителей в дипиррольном фрагменте. Большая доступность наклоненного пиррольного кольца для протонов приводит к увеличению скорости протонирования  $d[H_4Cor^+]/d[H^+]$ , что проявляется в большем наклоне кривой титрования в области точки перегиба. Значение  $pK_a$  коррелирует с суммой констант Гаммета алкильных заместителей макроцикла, и, поскольку алкильные группы являются донорами электронной плотности,  $pK_a(H_3OAlkCor) > pK_a(H_3TAlkCor)$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gladkov L. L., Klenitsky D. V., Kruk M. M. Absorption spectra of protonated corroles: two distinct patterns due to peripheral substitution architecture // *Organics*. – 2023. – No. 4. – P. 490–502.

УДК 535.34+535.35+535.372

Д.В. Кленицкий, доц., канд. физ.-мат. наук (БГТУ, г. Минск);  
Л.Л. Гладков, д-р физ.-мат. наук, проф., (БГАС, г. Минск);  
И.В. Вершиловская, доц., канд. биол. наук (БГТУ, г. Минск);  
Н.Н. Крук, д-р физ.-мат. наук, зав. каф., (БГТУ, г. Минск)

## **ОБ ИЗМЕНЕНИИ АРОМАТИЧНОСТИ ТЕТРАПИРРОЛЬНЫХ МАКРОЦИКЛОВ ПРИ ЗАСЕЛЕНИИ НИЖНЕГО ТРИПЛЕТНОГО T1 СОСТОЯНИЯ**

Используя методы квантовой химии, мы изучаем степень ароматичности, а также молекулярную конформацию тетрапиррольных соединений, различающихся природой соединительных мостиков между пиррольными фрагментами макроцикла [1], в основном синглетном S0 и нижнем возбужденном триплетном T1 состояниях. Природа соединительных мостиков определяет характер электронной коммуникации между отдельными пиррольными фрагментами путем формирования условий для сопряжения  $\pi$ -электронов и образования делокализованной электронной системы. У порфирина пиррольные кольца соединены метиновыми Ca–CH=Ca мостиками, обеспечивающими формирование симметричного макроцикла с сопряженной ароматической системой. Молекула тетрагидропорфирина отличается от молекулы порфирина гибридизацией Cb атомов пирролениновых колец. Порфицен представляет собой структурный изомер порфирина и отличается от него типом соединительных мостиков. Два из них представляют прямые Ca–Ca связи, а две другие цепочки метиновых связей Ca–CH=CH–Ca и Ca=CH–CH=Ca. Норкоррол представляет собой антиароматичный порфириноид с сокращенным макроциклом. У него две прямых Ca–Ca связи и два метиновых Ca–CH=Ca мостика. Молекулы свободных оснований корролов имеют один прямой Ca–Ca соединительный мостик и три метиновых мостика, а также могут формировать два NH-таутомера, различающиеся расположением трех протонов в ядре макроцикла. Оптимизацию молекулярной геометрии исследуемых соединений проводили с использованием метода функционала плотности (DFT) с помощью пакета программы для квантово-химических расчетов «Природа» [2].

В качестве меры ароматичности молекулы мы использовали индекс ароматичности ИНОМА [3]. В ароматических контурах сопряжения индекс ИНОМА близок к единице, а в неароматических является малым и может быть отрицательным. Молекулярную конформацию исследованных соединений анализировали с помощью диаграмм Эншенмозера, представляющих собой линейную развертку макроциклических атомов относительно средней плоскости макроцикла. Количе-

ственно величина неплоскостных искажений молекулы характеризовалась параметром  $\Delta k$  численно равным среднему квадратичному отклонению атома макроцикла от средней плоскости макроцикла [4] (для порфирина, тетрагидропорфирина и порфицена  $k = 24$ , для таутомеров коррола  $k = 23$ , для норкоррола  $k = 22$ ).

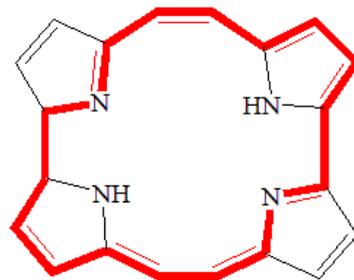
У порфирина наибольшим значением индекса ароматичности НОМА в основном  $S_0$  состоянии обладает 18-электронный крестоподобный контур сопряжения, изображенный на рис. 1а с индексом ароматичности ИНОМА = 0,8264. В триплетном  $T_1$  состоянии максимальное значение индекса НОМА имеет 22-электронный контур Шлейера рис. 1б с ИНОМА = 0,6756. Заметим, что молекула порфирина является совершенно плоской как в основном  $S_0$ , так и в нижнем триплетном  $T_1$  состояниях. Для нее параметр  $\Delta_{24} = 0$  в независимости от энергетического состояния молекулы. Изменение степени ароматичности свободного основания порфирина при этом обусловлено изменением электронной структуры молекулы, вследствие чего изменяется электронное взаимодействие между атомами макроцикла.



Рисунок 1 – Доминирующие контуры сопряжения в молекуле порфирина

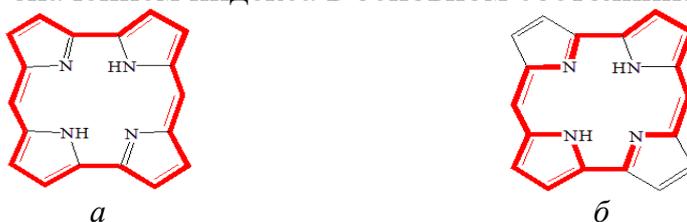
Гидрирование Св–Св связей пирролениновых колец порфирина не затрагивает доминирующие контуры сопряжения молекулы порфирина. Поэтому для тетрагидропорфирина максимальными значениями индекса НОМА как для основного  $S_0$  состояния, так и для нижнего триплетного  $T_1$  состояния обладают те же контуры сопряжения. При этом доминирующим контуром сопряжения в этих состояниях является крестоподобный контур с ИНОМА = 0,8558 для основного состояния и ИНОМА = 0,8001 для триплетного состояния. При  $sp^2 \rightarrow sp^3$  перегибридации Св атомов в молекуле формируется слабые локальные искажения плоскостного строения, величина которых значительно увеличивается в нижнем триплетном  $T_1$  состоянии:  $\Delta_{24} = 0,196 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}$  и  $\Delta_{24} = 0,584 \cdot 10^{-2} \text{ \AA}$  для  $S_0$  и  $T_1$  состояний соответственно. Однако эти искажения плоскостности локализованы на пирролениновых фрагментах и практически не затрагивают макрогетероциклическую структуру в целом.

У порфицена наибольшим значением индекса ароматичности в основном  $S_0$  состоянии, как и у порфирина, обладает крестоподобный контур сопряжения рис. 1а (с учетом разных соединительных мостиков) с  $\text{ИНОМА} = 0,7707$ . В триплетном  $T_1$  состоянии доминирующий контур сопряжения изменяется рис. 2 с  $\text{ИНОМА} = 0,5158$ . По сравнению с порфирином можно утверждать, что проводимость через атомы азота пиррольных В и D колец ухудшилась. У порфицена имеются незначительные асимметричные отклонения от плоскостного строения, однако их амплитуда очень мала. Величина параметра равна  $\Delta_{24} = 0,25 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$  и  $\Delta_{24} = 0,94 \cdot 10^{-5} \text{ \AA}$  для  $S_0$  и  $T_1$  состояний соответственно.



**Рисунок 2 – Доминирующий контур сопряжения молекулы порфицена в триплетном  $T_1$  состоянии**

У норкоррола индексы ароматичности для всех изученных контуров сопряжения, оказались меньше в основном состоянии, чем в нижнем триплетном состоянии. Доминирующим контуром в основном состоянии является контур, содержащий 18  $\pi$ -электронов рис. 3а с  $\text{ИНОМА} = 0,3929$ . В данном контуре проводимость вдоль внешних Св–Св связей оказывается большей по сравнению с проводимостью вдоль связей содержащих атомы азота. В триплетном состоянии проводимость вдоль этих связей увеличивается так, что доминирующим становится 18 электронный контур рис. 3б с индексом ароматичности  $\text{ИНОМА} = 0,4805$ . При этом значение индекса увеличивается в 1,6 раза по сравнению с значением индекса в основном состоянии.



**Рисунок 3 – Доминирующие контуры сопряжения в молекуле норкоррола**

У молекулы норкоррола формируется выраженная куполообразная структура, главной причиной формирования которой являются стерические взаимодействия в сокращенном ядре макроцикла. Причем степень неплоскостных искажений в нижнем триплетном  $T_1$  состоянии  $\Delta_{22} = 0,329 \text{ \AA}$ , оказывается больше чем в основном состоянии  $\Delta_{22} = 0,297 \text{ \AA}$ .

Для  $T_1$  и  $T_2$  таутомеров свободного основания коррола наибольшими значениями индекса ароматичности как в основном  $S_0$ ,

так и в нижнем триплетном T<sub>1</sub> состояниях обладают контуры сопряжения, содержащие 18 π-электронов. Доминирующие контуры сопряжения для двух таутомеров различаются как в основном S<sub>0</sub>, так и в нижнем триплетном T<sub>1</sub> состояниях. У длинноволнового таутомера T<sub>1</sub> в основном S<sub>0</sub> состоянии наибольшим значением индекса ароматичности обладает контур рис. 4а с I<sub>НОМА</sub> = 0,6645, а в триплетном состоянии контур рис. 4б с I<sub>НОМА</sub> = 0,5220. В триплетном состоянии у T<sub>1</sub> таутомера изменяется соотношение проводимости вдоль атома азота и внешних атомов углерода пиррольного кольца D по сравнению с основным S<sub>0</sub> состоянием.



Рисунок 4 – Доминирующие контуры сопряжения T<sub>1</sub> таутомера коррола

У коротковолнового таутомера T<sub>2</sub> в основном S<sub>0</sub> состоянии, как и в триплетном T<sub>1</sub> состоянии доминирующим является контур рис. 5. Индекс ароматичности для основного S<sub>0</sub> состояния I<sub>НОМА</sub> = 0,6421, а для триплетного T<sub>1</sub> состояния I<sub>НОМА</sub> = 0,5474. В основном S<sub>0</sub> состоянии индекс ароматичности немного меньше, чем для T<sub>1</sub> таутомера, а в триплетном состоянии наоборот больше. По абсолютному значению индексы ароматичности в основном S<sub>0</sub> состоянии близки к индексам ароматичности порфирина в триплетном T<sub>1</sub> состоянии.

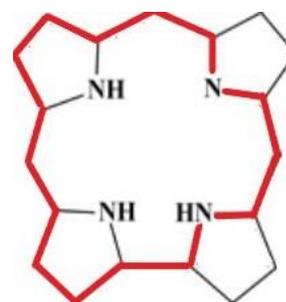


Рисунок 5 – Доминирующий контур сопряжения в молекуле T<sub>2</sub> таутомера коррола

Наличие в ядре сокращенного макроцикла корролов трех протонов приводит к нарушению планарности тетрапиррольного макроцикла. Протоны не могут разместиться в плоскости ядра, что влечет за собой альтернированное отклонение пиррольных колец от средней плоскости макроцикла. Оба таутомера в S<sub>0</sub> состоянии характеризуются волнообразной конформацией макроцикла с Δ<sub>23</sub> = 0,163 и 0,152 Å для T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> таутомеров соответственно.

Степень неплоскостных искажений таутомеров увеличивается при заселении триплетного состояния, для которого Δ<sub>23</sub> = 0,209 и 0,204 Å

соответственно. При этом таутомер T1 сохраняет волнообразный характер неплоскостных искажений, в то время как таутомер T2 испытывает конформационный переход от волнообразного типа искажения к седлообразному.

Проведенный анализ показал, что при заселении триплетного состояния конфигурация доминирующих контуров сопряжения, а также степень ароматичности макроцикла изменяется.

При этом справедливым оказывается правило Берда [5]: степень ароматичности ароматических соединений в триплетном состоянии уменьшается по сравнению с основным состоянием, и наоборот, у неароматических соединений степень ароматичности увеличивается. Указанные изменения связаны как с изменением конфигурационного взаимодействия соединений, так и с конформационными перестройками в макроциклах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крук Н. Н. Строение и оптические свойства тетрапиррольных соединений. Минск: БГТУ. – 2019. – 216 с.
2. Laikov D. N. Fast evaluation of density functional exchange-correlation terms using the expansion of the electron density in auxiliary basis sets // *Chem. Phys. Lett.* – 1997. – Vol. 28, Issues 1–3. – P. 151–156.
3. Woller T., Geerling P., De Proft F., Champagne B., Alonso M. Aromaticity as a guiding concept for spectroscopic features and nonlinear optical properties of porphyrinoids // *Molecules.* – 2018. – V. 23, № 6. – P. 1333.
4. Kruk M. M., Klenitsky D. V., Maes W. Molecular structure and conformation of free base corroles // *Macroheterocycles.* – 2019. – V. 12. №1. – P. 58–67.
5. Baird N. C. Quantum organic photochemistry. II. Resonance and aromaticity in the lowest  $3\pi\pi^*$  state of cyclic hydrocarbons // *J. Am. Chem. Soc.* – 1972. – V. 94, № 14. – P. 4941–4948.

А.Б. Крылов, доц., канд. биол. наук;  
Д.Н. Пискунович, студ.;  
Н.Н. Крук, д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой  
(БГТУ, г. Минск)

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА КИСЛОТНО-ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА 5,10,15,20-ТЕТРАКИС-(4- ТРИМЕТИЛАМИНО- ФЕНИЛ)-ПОРФИРИНА В ОСНОВНОМ S<sub>0</sub> И НИЖНЕМ ВОЗБУЖДЕННОМ S<sub>1</sub> СИНГЛЕТНОМ СОСТОЯНИИ**

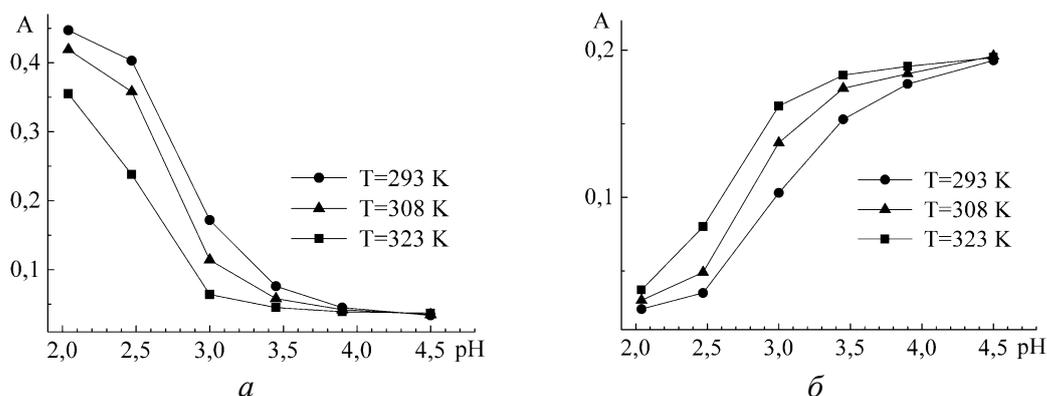
В настоящей работе с использованием методов абсорбционной и люминесцентной спектроскопии изучено влияние температуры на кислотно-основные свойства гидрофильного 5,10,15,20-тетраakis-(4-триметиламинофенил)-порфирина (далее, Н<sub>2</sub>ТАФП). Измерены спектры поглощения в растворах с различными рН при температурах 293, 308 и 323 К. Измерены спектры поглощения и флуоресценции при рН = 3,0 при варьировании температуры в диапазоне от 288 до 323 К. Построены зависимости Вант-Гоффа для присоединения и диссоциации протона с целью вычисления энергии активации этих процессов. Определен квантовый выход флуоресценции из нижнего возбужденного S<sub>1</sub> состояния при различных температурах.

Анализ изменений спектральных характеристик при увеличении рН показывают, что уменьшается поглощение дважды протонированной формы, которая имеет максимум длинноволновой полосы поглощения при 640 нм, и растет поглощение свободного основания, которое имеет наиболее интенсивную полосу поглощения с максимумом при 515 нм.

Следует отметить отсутствие изобестической точки в измеренной серии спектров, что указывает на последовательный характер присоединения/диссоциации протонов с образованием монопротонированной формы в заметной концентрации.

Кривые спектрофотометрического титрования (рис. 1), построенные по поглощению на длинах волн, соответствующим равновесию между различными формами порфирина (дважды протонированная форма ↔ монопротонированная форма,  $\lambda = 640$  нм; монопротонированная форма ↔ свободное основание,  $\lambda = 515$  нм), различаются ввиду последовательного присоединения протонов. На кривых титрования выделить в явном виде две стадии не представляется возможным, что указывает на близость значений констант основности  $pK_{a3}$  и  $pK_{a4}$ . Однако рассчитанная по уравнению Хендерсона-Хассельбалха величина обобщенной константы  $pK_{a3,4}$  для присоединения двух протонов

оказалась различной для двух кривых титрования. На длине волны титрования 515 нм рассчитанные значения  $pK_{a3,4}$  оказались систематически больше значений  $pK_{a3,4}$ , рассчитанных по кривой титрования на длине волны 640 нм во всем температурном диапазоне. Очевидно, что это различие является проявлением двух последовательных стадий протонирования.



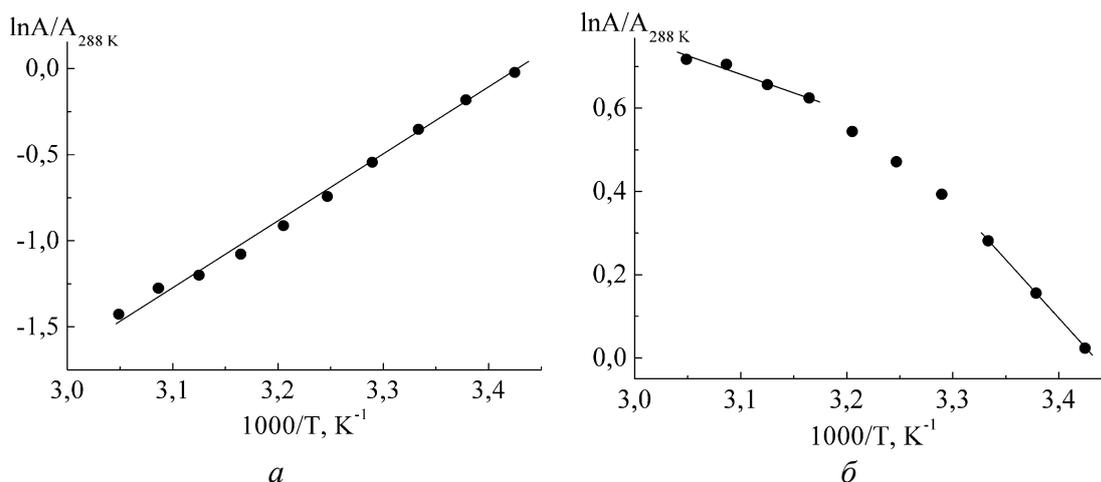
**Рисунок 1 – Кривые спектрофотометрического титрования  $H_2TAFP$**   
 $a - \lambda = 640$  нм;  $b - \lambda = 515$  нм

Зависимость кислотно-основного равновесия от температуры обусловлена тем, что процессы протонирования и депротонирования имеют активационный характер. Для определения энтальпии активации измерена температурная зависимость спектров поглощения раствора порфирина при  $pH = 3,0$  в диапазоне температур 288 – 328 К.

Рост температуры приводит к падению поглощения дважды протонированной формы и увеличению поглощения свободного основания порфирина. Установлено, что энтальпия активации присоединения протонов  $\Delta H = 2600 \pm 100 \text{ см}^{-1}$  остается постоянной, в то время как энтальпия активации депротонирования зависит от температуры и составляет  $2150 \pm 150 \text{ см}^{-1}$  и  $670 \pm 100 \text{ см}^{-1}$  соответственно, при температурах ниже 296 К и выше 320 К.

Нелинейность графика Вант-Гоффа (рис. 2) на длине волны 515 нм указывает на специфическую сольватацию, которая, вероятно, обусловлена существованием двух форм воды, по-разному сольватирующих молекулы в растворе.

Одна форма характеризуется разупорядоченными водородными связями и доминирует при высоких температурах, в то время как другая характеризуется структурированной сетью водородных связей и преобладает при температурах ниже 293 К [2].



**Рисунок 2 – Графики Вант-Гоффа для кислотно-основных равновесий H<sub>2</sub>ТАФП *a* – λ = 640 нм; *б* – λ = 515 нм**

В связи с тем, что в серии спектров поглощения отсутствует изобестическая точка, для измерения спектров флуоресценции выбрана λ<sub>возб</sub> = 578 нм, на которой относительные изменения оптической плотности не превышают 5%. Доли молекул свободного основания [H<sub>2</sub>ТАФП] и дважды протонированной формы [H<sub>4</sub>ТАФП<sup>2+</sup>] = 1 – [H<sub>2</sub>ТАФП] в нижнем возбужденном S<sub>1</sub> состоянии рассчитаны из балансного уравнения с использованием измеренного квантового выхода флуоресценции раствора Φ<sub>фл</sub> при различных температурах (Таблица):

$$\Phi_{\text{фл}} = [\text{H}_2\text{ТАФП}] \Phi_{\text{фл}}^0(\text{H}_2\text{ТАФП}) + (1 - [\text{H}_2\text{ТАФП}]) \Phi_{\text{фл}}^0(\text{H}_4\text{ТАФП}^{2+}),$$

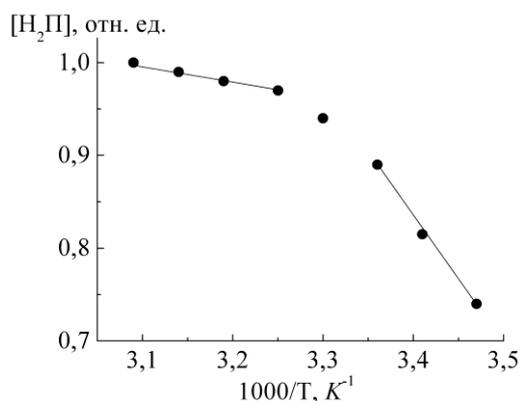
где Φ<sub>фл</sub><sup>0</sup>(H<sub>2</sub>ТАФП) и Φ<sub>фл</sub><sup>0</sup>(H<sub>4</sub>ТАФП<sup>2+</sup>) – квантовые выходы флуоресценции соответствующих форм. Доля молекул в дважды протонированной форме [H<sub>4</sub>ТАФП<sup>2+</sup>] равна 1 – [H<sub>2</sub>ТАФП].

**Таблица – Доля свободного основания и дважды протонированной формы 5,10,15,20-тетракис-(4-триметиламинофенил)-порфирина и квантовый выход флуоресценции нижнего возбужденного S<sub>1</sub> состояния в водном растворе при различных температурах**

T, K	288	293	298	303	308	313	318
[H <sub>2</sub> ТАФП]	0,74	0,815	0,89	0,94	0,97	0,98	0,99
Φ <sub>фл</sub> ·10 <sup>2</sup>	6,35	6,03	5,7	5,46	5,33	5,28	5,23

Анализ результатов, представленных в таблице, позволяет заключить, что температурные зависимости для основного S<sub>0</sub> и нижнего возбужденного S<sub>1</sub> состояний аналогичны – рост температуры сопровождается депротонированием порфирина и увеличением доли сво-

бодного основания. График Вант-Гоффа (рис. 3) не линеаризуется и имеет вид выпуклой кривой, что так же можно интерпретировать как проявление последовательного присоединения/диссоциации протонов в нижнем возбужденном  $S_1$  состоянии.



**Рисунок 3 – График Вант-Гоффа для относительной концентрации молекул  $H_2ТАФП$  в возбужденном  $S_1$  состоянии в диапазоне температур 288 – 318 К**

Таким образом, в результате исследования установлено, что дважды протонированная форма 5,10,15,20-тетракис-(4-триметил-аминофенил)-порфирина формируется в результате последовательного присоединения двух протонов [3], при этом с ростом температуры кислотно-основное равновесие смещается в сторону стабилизации свободного основания порфирина.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крук Н. Н. Структура и оптические свойства тетрапиррольных соединений / Н. Н. Крук // Минск, БГТУ. – 2019. – С. 216.
2. Климович П. Г., Крылов А.Б., Крук Н. Н. Спектральные проявления специфической сольватации 5,10,15,20-тетракис(4-сульфонатофенил)-порфирина и его дважды протонированной формы в водных растворах // Журн. прикл. спектр. – 2021. – Т. 88, № 1. – С. 25–33.
3. Пискунович Д. Н., Крылов А. Б., Крук Н. Н. Температурная зависимость кислотно-основных свойств 5,10,15,20-тетракис-(4-триметиламинофенил)-порфирина // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – 2025. – № 2 (296). – С. 27–32.

Е.В. Фарафонтова, доц., канд. физ.-мат. наук;  
И.И. Наркевич, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
(БГТУ, г. Минск)

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭНЕРГИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПОЛЯ ПЛОТНОСТИ В НАНОРАЗМЕРНЫХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМАХ

Разработанный ранее двухуровневый статистический метод описания свойств неоднородных молекулярных систем позволил составить схему статистического расчета большого термодинамического потенциала  $\Omega$  с произвольным полем плотности. Поэтому потенциал  $\Omega$  является функционалом поля плотности и может использоваться для описания флуктуаций. Основная особенность этого нового статистического подхода состоит в том, что его можно использовать при изучении флуктуаций как в макроскопических системах, так и в наноразмерных системах (наночастицах), тогда как широко известные результаты феноменологической теории флуктуаций и микроскопического подхода на основе ренормализационной группы с модельными гамильтонианами относятся к бесконечным системам.

Введение статистического ансамбля взаимодействующих элементарных флуктуаций плотности (ЭФП) в рамках статистического метода как раз и позволило сформулировать идею о принципиальной возможности реализации сокращенного статистического описания термодинамических флуктуаций без перехода в импульсное пространство. При этом каждая из ЭФП характеризуется набором параметров, обозначенным как  $x_i$ . Индекс  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ) определяет положения микроячеек молекулярного размера, на которые мысленно разделен весь объем системы в статистическом методе условных распределений Ротта [1] ( $M$  – общее число микроячеек). Для описания взаимодействия в системе ЭФП как квазичастиц, используется цепочка потенциалов для одиночных ЭФП с одним центром –  $\Psi\{x_i\}$ , бинарных ЭФП с двумя центрами –  $\Psi\{x_i, x_j\}$  и так далее. Они описывают соответственно взаимодействие одиночных ЭФП со средой и двух ЭФП друг с другом, образующих в соответствии с принципом суперпозиции бинарную флуктуацию плотности. В результате большой термодинамический потенциал  $\Omega\{\rho_i\}$  неоднородной системы с произвольным флуктуирующим полем плотности  $\rho_i$ , можно представить в виде разложения по неприводимым эффективным потенциалам  $\Psi$  [2]:

$$\Omega\{\rho_l\} = \Omega\{\rho_{cp}\} + \sum_{i=1}^M \Psi\{x_i\} + \sum_{i<j}^M \Psi\{x_i, x_j\} + \sum_{i<j<k}^M \Psi\{x_i, x_j, x_k\}; \quad (1)$$

$$\Psi\{x_i\} = \tilde{\Omega}\{x_i\}; \quad \Psi\{x_i, x_j\} = \tilde{\Omega}\{x_i, x_j\} - \tilde{\Omega}\{x_i\} - \tilde{\Omega}\{x_j\}; \quad (2)$$

$$\Psi\{x_i, x_j, x_k\} = \tilde{\Omega}\{x_i, x_j, x_k\} - \tilde{\Omega}\{x_i, x_j\} - \tilde{\Omega}\{x_j, x_k\} - \tilde{\Omega}\{x_i, x_k\}. \quad (3)$$

Здесь  $\Omega(\rho_{cp})$  – большой термодинамический потенциал системы со средним равновесным полем плотности  $\rho_{cp}$ ,  $\tilde{\Omega}\{x_i\}$  – флуктуационная часть большого термодинамического потенциала  $\Omega$  системы с одной одиночной ЭФП во всем объеме;  $\tilde{\Omega}\{x_i, x_j\}$  – аналогичный потенциал системы с двумя ЭФП, образующими бинарную флуктуацию плотности с двумя центрами на расстоянии  $r$  друг от друга.

В качестве примера запишем первое интегро-дифференциальное уравнение для коррелятивной функции  $W_1\{x_i\}$  элементарной флуктуации:

$$\frac{\partial W_1\{x_i\}}{\partial x_i} + \frac{1}{\theta} \frac{\partial \Psi\{x_i\}}{\partial x_i} W_1\{x_i\} + \frac{1}{\theta} \sum_{j \neq i}^M \int_{x_j} \frac{\partial \Psi\{x_i, x_j\}}{\partial x_i} W_2\{x_i, x_j\} dx_j = 0. \quad (4)$$

Здесь  $W_1\{x_i\}$  – одночастичная коррелятивная функция, описывающая распределение одиночной ЭФП с центром в микроячейке с номером  $i$ , а  $W_2\{x_i, x_j\}$  – аналогичная функция для бинарной ЭФП с параметрами, относящимися к микроячейкам с номерами  $i$  и  $j$ .

Использование ЭФП в виде сферических волн с различными значениями амплитуд  $x$  и волновых чисел  $k$  [3] позволяет рассчитывать потенциалы  $\tilde{\Omega}(x_1, k_1)$  и  $\tilde{\Omega}(x_1, k_1, x_2, k_2, r)$  соответственно для одиночных и бинарных флуктуаций, которые являются энергиями образования этих флуктуаций на фоне равновесного поля плотности среды. В данной работе численные расчеты выполнены с помощью компьютерных программ (в системе Mathcad), где все величины обезразмерены с помощью потенциала Леннард-Джонса. Конкретные расчеты выполнены для наночастицы радиусом  $R = 31,4038$  (примерно 15 нм). Она находится в термостате при температуре  $\theta = 2,1$ , которая выше критической. Плотность однородной среды  $\rho = 1 / v = n_c / \omega$ , здесь  $v$  – молекулярный объем,  $n_c = 0,5$  – средние числа заполнения элементарных микроячеек объемом  $\omega$  кубической решетки с расстоянием между ближайшими узлами  $d = 1,096$ . Для этих термодинамических параметров химический потенциал  $\mu = -3,5044$  при учете взаимодействия каждой молекулы в наночастице с тремя ближайшими соседями в решетке.

В качестве примера на рис. 1 представлена двумерная матрица спектральной зависимости  $\tilde{\Omega}(x_1, k_1, x_2, k_2)$  от  $k_1$  и  $k_2$  для бинарных ЭФП с

заданными значениями амплитуд  $x_1$  и  $x_2$  (два первых элемента нулевого столбца матрицы). Остальные элементы нулевой строки содержат исходные параметры равновесной среды и компьютерной программы численных расчетов. Массивы волновых чисел  $k_1$  и  $k_2$  в интервале от нуля до 0,5 расположены в нулевом столбце и первой строке матрицы.

0.05	2.1	-3.5044	0.5	6	$1 \times 10^3$	300	10	$1.324 \times 10^3$	31.4038	0	0
0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
0	0.9878	0.8116	0.5537	0.3278	0.2271	0.2737	0.3	0.2717	0.2665	0.2612	0.2428
0.05	0.8116	0.7	0.5296	0.3462	0.2545	0.2953	0.3186	0.2922	0.2886	0.2845	0.2666
0.1	0.5537	0.5296	0.4734	0.3485	0.2714	0.3058	0.3272	0.3041	0.3019	0.299	0.2827
0.15	0.3278	0.3462	0.3485	0.2571	0.1888	0.2215	0.2447	0.2246	0.2214	0.2181	0.2039
0.2	0.2271	0.2545	0.2714	0.1888	0.1237	0.1593	0.1859	0.1673	0.1636	0.1598	0.1464
0.25	0.2737	0.2953	0.3058	0.2215	0.1593	0.1968	0.2222	0.2039	0.2031	0.2006	0.1861
0.3	0.3	0.3186	0.3272	0.2447	0.1859	0.2222	0.2434	0.2241	0.2261	0.2255	0.2106
0.35	0.2717	0.2922	0.3041	0.2246	0.1673	0.2039	0.2241	0.2026	0.203	0.2029	0.1897
0.4	0.2665	0.2886	0.3019	0.2214	0.1636	0.2031	0.2261	0.203	0.1999	0.1994	0.1877
0.45	0.2612	0.2845	0.299	0.2181	0.1598	0.2006	0.2255	0.2029	0.1994	0.1987	0.1868
0.5	0.2428	0.2666	0.2827	0.2039	0.1464	0.1861	0.2106	0.1897	0.1877	0.1868	0.1748

**Рисунок 1 – Матрица  $\tilde{\Omega}(0,5,k_1,0.5,k_2,12)$  с заданными амплитудами одинакового знака**

Выполненные в работе численные расчеты энергии образования бинарных флуктуаций плотности показали, что сформулированная ранее идея о принципиальной возможности сокращенного статистического описания флуктуаций поля плотности может быть практически реализована в координатном пространстве при исследовании вкладов тепловых флуктуаций в термодинамические характеристики наноразмерных систем, что в принципе невозможно сделать известными из литературы методами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ротт Л. А. Статистическая теория молекулярных систем. М.: Наука, – 1979. – 280 с.
2. Наркевич И. И. Сокращенное описание неоднородных систем на основе условных пространственных корреляционных функций плотности // Известия АН БССР, серия физико-математических наук. –1980. – № 5. – С. 107–112.
3. Наркевич И. И., Фарафонтова Е. В. Практическая реализация идеи о сокращенном описании флуктуаций поля плотности с помощью двухуровневого статистического метода // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. –2022. – № 2 (260). – С. 49–54.

И.И. Наркевич, д-р физ.-мат. наук, проф.,  
Е.В. Фарафонтова, доц., канд. физ.-мат. наук;  
(БГТУ, г. Минск)

## СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ В МОЛЕКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ

Экспериментальные и теоретические исследования тепловых флуктуаций в макроскопических системах имеют давнюю историю, которая содержит фундаментальные результаты, полученные многочисленными исследователями. Наиболее интересные результаты относятся к термодинамическим областям в окрестностях критических точек разной природы, в которых реализуются критические явления. Не вникая в детали феноменологического описания флуктуаций с помощью гипотезы подобия, заметим, что эти исследования базируются на использовании модельных гамильтонианов для систем многих взаимодействующих частиц, с последующим применением сложных масштабных преобразований. Это означает, что в этих многочисленных подходах не в полной мере реализованы возможности, содержащиеся в статистическом методе Боголюбова – Борна – Грина – Кирквуда – Ивона (ББГКИ), который предполагает расчет характеристик системы многих частиц с учетом их взаимодействия, которое описывается соответствующими межмолекулярными потенциалами.

Ранее предприняты первые шаги для практической реализации идеи о принципиальной возможности сокращенного описания флуктуаций поля плотности с помощью введенной цепочки коррелятивных функций для ансамбля взаимодействующих *элементарных флуктуаций плотности* (ЭФП). Они возникают и исчезают случайным образом с определенной вероятностью на фоне однородной макроскопической системы с заданными параметрами, и поэтому их можно рассматривать как квазичастицы. Взаимодействие ЭФП с однородной средой и между собой описывается с помощью потенциалов одиночных  $\Psi(x_i)$  и бинарных  $\Psi(x_i, x_j)$  ЭФП.

Для практической реализации этой возможности предложено использовать одиночные ЭФП в виде пространственных сферических волн [1] с центрами, совпадающими с центрами микроячеек, которые образуют гипотетическую решетку метода условных распределений Ротта [2], с номерами  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ;  $r_i$  – модуль радиус-вектора с началом в центре микроячейки с номером  $i$ ):

$$\Delta n\{x_i\} = \Delta n(x, k, r_i) = n(r_i) - n_{\text{cp}} = x \frac{\sin(kr_i)}{kr_i}. \quad (1)$$

Здесь  $\Delta n = n(r_i) - n_{\text{cp}}$  – поле одиночной флуктуации в окрестности микроячейки с номером  $i$ , которое определяет отклонение чисел заполнения молекулами всех микроячеек от их средних равновесных значений в объеме системы (заметим, что в двухуровневом статистическом методе описания неоднородных систем числа заполнения  $n$  микроячеек пропорциональны плотности  $\rho$  вещества в объеме системы).

Согласно выражению (1), каждая одиночная ЭФП имеет два параметра:  $x$  – амплитуда волны в центре флуктуации (ядре квазичастицы),  $k$  – волновое число. Поэтому потенциалы взаимодействия  $\Psi$ , а следовательно и функции распределения  $W$ , являясь функционалами полей одиночных ЭФП, оказываются функциями двух параметров и расстояния  $r$  между их центрами, т. е.  $\Psi\{x_i\} = \Psi(x_1, k_1)$ ;  $\Psi\{x_i, x_j\} = \Psi(x_1, k_1, x_2, k_2, r)$ ;  $W_1\{x_i\} = W_1(x_1, k_1)$ ;  $W_2\{x_i, x_j\} = W_2(x_1, k_1, x_2, k_2, r)$ .

Это позволит рассчитать бинарную корреляционную функцию  $G(\vec{r})$  флуктуаций наноразмерной частицы либо макроскопической системы с помощью бинарной функции  $W_2(x_1, k_1, x_2, k_2, r)$  по формуле:

$$G(\vec{r}) = \omega^{-2} \int \int \int \int \Delta n(x_1, k_1, 0) \cdot \Delta n(x_2, k_2, \vec{r}) W_2(x_1, k_1, x_2, k_2, \vec{r}) dx_1 dk_1 dx_2 dk_2. \quad (2)$$

Если предположить, что статистический ансамбль ЭФП состоит только из одиночных и бинарных ЭФП, то для бинарной функции  $W_2(x_1, k_1, x_2, k_2, r)$  получается приближенное выражение:

$$W_2(x_1, k_1, x_2, k_2, \vec{r}) = C \exp\{-\tilde{\Omega}(x_1, k_1, x_2, k_2, \vec{r}) / \theta\}, \quad (3)$$

где  $C$  – нормировочная постоянная, а энергия образования бинарной флуктуации  $\tilde{\Omega}(x_1, k_1, x_2, k_2, r) = \Psi(x_1, k_1, x_2, k_2, r) + \Psi(x_1, k_1) + \Psi(x_2, k_2)$ .

Переходя от интегрирования в выражении (2) к суммированию с учетом (3), запишем окончательное выражение для функции  $G(\vec{r})$ :

$$G(\vec{r}) = \frac{\sum_{x_1} \sum_{x_2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} (\Delta n(x_1, k_1, 0) \Delta n_2(x_2, k_2, \vec{r}) e^{-\tilde{\Omega}(x_1, k_1, x_2, k_2, \vec{r})/\theta})}{\omega^2 \sum_{x_1} \sum_{x_2} \sum_{k_1} \sum_{k_2} e^{-\tilde{\Omega}(x_1, k_1, x_2, k_2, \vec{r})/\theta}}. \quad (4)$$

Расчеты выполнены для наночастицы с безразмерным радиусом  $R = 31,404$ , что примерно соответствует 15 нанометрам. Она находится в термостате при температуре  $\theta = 2,1$ , которая выше критической. Плотность однородной среды  $\rho = 1 / v = n_{\text{cp}} / \omega$ ,  $v$  – молекулярный объем,  $n_{\text{cp}} = 0,5$  – средние числа заполнения элементарных микроячеек

объемом  $\omega$  кубической решетки с расстоянием между ближайшими узлами  $d = 1,096$ . Для этих термодинамических параметров химический потенциал  $\mu = -3,5044$ .

Для примера на рис. 1 приведена двумерная матрица спектральной зависимости  $\Psi(x_1, k_1, x_2, k_2, r)$  от  $k_1$  и  $k_2$  для бинарной ЭФП с заданными значениями амплитуд  $x_1 = x_2 = 0,05$  (два первых элемента нулевого столбца матрицы). Массивы волновых чисел  $k_1$  и  $k_2$  расположены в нулевом столбце и первой строке матрицы.

0.05	2.1	-3.5044	0.5	6	$1 \times 10^3$	300	10	$1.324 \times 10^3$	31.4038
0.05	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
0	0.711	0.5106	0.2347	0.0835	0.0355	0.0381	0.0367	0.0271	0.0234
0.05	0.5106	0.3748	0.1864	0.0777	0.0387	0.0355	0.0311	0.0234	0.0213
0.1	0.2347	0.1864	0.1122	0.062	0.0376	0.028	0.0217	0.0173	0.0166
0.15	0.0835	0.0777	0.062	0.0453	0.0297	0.0184	0.0139	0.0125	0.0108
0.2	0.0355	0.0387	0.0376	0.0297	0.0173	$8.9 \times 10^{-3}$	$7.8 \times 10^{-3}$	$7.9 \times 10^{-3}$	$5.7 \times 10^{-3}$
0.25	0.0381	0.0355	0.028	0.0184	$8.9 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$
0.3	0.0367	0.0311	0.0217	0.0139	$7.8 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-4}$	$-6.4 \times 10^{-3}$	$-7 \times 10^{-3}$	$-3.5 \times 10^{-3}$
0.35	0.0271	0.0234	0.0173	0.0125	$7.9 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$	$-7 \times 10^{-3}$	$-9.8 \times 10^{-3}$	$-7.9 \times 10^{-3}$
0.4	0.0234	0.0213	0.0166	0.0108	$5.7 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-3}$	$-3.5 \times 10^{-3}$	$-7.9 \times 10^{-3}$	$-9.5 \times 10^{-3}$
0.45	0.0205	0.0196	0.0161	$9.9 \times 10^{-3}$	$4.3 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$	$-1.7 \times 10^{-3}$	$-5.6 \times 10^{-3}$	$-7.6 \times 10^{-3}$
0.5	0.0163	0.0159	0.014	$9.9 \times 10^{-3}$	$5.1 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-4}$	$-2.4 \times 10^{-3}$	$-4.6 \times 10^{-3}$	$-5.1 \times 10^{-3}$

**Рисунок 1 – Матрица  $\Psi(0.5, k_1, 0.5, k_2, 12)$  с заданными амплитудами одинакового знака**

Анализируя результаты расчетов можно отметить, что значения энергии взаимодействия одиночных ЭФП в пределах численных погрешностей компьютерных расчетов положительны для одинаковых по знаку амплитуд (рис. 1) и отрицательны в случае амплитуд противоположного знака. При этом видно, что по мере увеличения волновых чисел абсолютные значения энергий взаимодействия уменьшаются. Это согласуется с хорошо известным утверждением, что основной вклад в термодинамические характеристики вносят именно длинноволновые флуктуации с малыми волновыми числами.

#### ЛИТЕРАТУРА

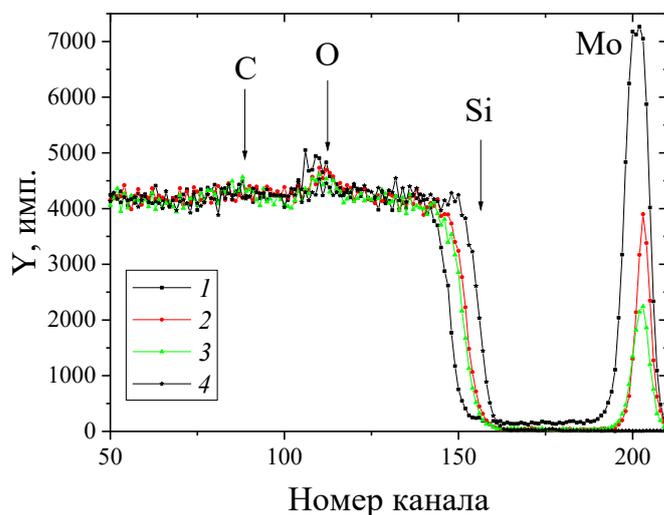
1. Наркевич И. И., Фарафонтова Е. В. Статистическое исследование флуктуации поля плотности в сферических молекулярных наночастицах // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. – 2024. – № 2 (284). – С. 25–29.
2. Ротт Л. А. Статистическая теория молекулярных систем. М.: Наука, – 1979. – 280 с.

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Ионное ассистирование в процессе осаждения покрытия влияет на кристаллическую структуру, плотность упаковки, адгезию и поверхность получаемого покрытия, что может повлиять на качество тонкопленочных устройств [1]. Осаждение металлических покрытий на кремний в условиях ионного ассистирования проводили с использованием вакуумного плазменно-дугового ионного источника. Этот тип ионного источника с электродами, изготовленными из материала осаждаемого покрытия, позволяет одновременно получать регулируемые потоки ионов металла  $J_i$  и нейтральных атомов  $J_A$  осаждаемого металла. В данной работе для создания покрытий применялся процесс осаждения Cr, Co, Mo, W на поверхность кремния в условиях ассистирования ускоренными ионами  $Cr^+$ ,  $Co^+$ ,  $Mo^+$ ,  $W^+$ , соответственно, при ускоряющем напряжении от 5 и 20 кВ. Время модифицирования кремния ионами  $Cr^+$  составляло 1, 3, 6 ч, что позволяло получить различные ионные потоки при нанесении Cr-покрытий и толщину покрытий. Осаждение кобальта, молибдена и вольфрама проводили на пластины Si (100) и на предварительно подготовленные структуры металл - Si (100) (металл: Co, Mo, W), которые приготавливали, используя этот же ионный источник в режиме пассивного осаждения покрытия при нулевом значении ускоряющего напряжения. Вакуум в процессе осаждения покрытий в рабочей камере достигал  $\sim 10^{-2}$  Па. Отношение плотности ионного потока к плотности нейтрального потока  $J_i / J_A$  составляло 0,02–0,45, что соответствовало росту покрытия на кремнии [2].

Экспериментальные спектры резерфордского обратного рассеяния (ROR) ионов гелия от кремниевых образцов, обработанных ионами  $Mo^+$  с одновременным осаждением покрытий Mo, показаны на рис. 1 Вертикальными стрелками отмечены номера каналов, которые связаны с энергиями рассеяния ионов гелия на атомах соответствующих элементов, локализованных на поверхности образцов. В числе элементов, находящихся в поверхностном слое исследуемых материалов, на спектрах идентифицируются молибден, а также C, O, Si. Сдвиг сигнала от кремния в область меньших номеров каналов на спектрах

1, 2 и 3 РОР, приведенных на рис. 1, свидетельствует о том, что на поверхности кристалла кремния образуется покрытие. Аналогичные закономерности по элементному составу и росту покрытий на кремнии наблюдались на спектрах РОР от образцов Si и структур металл–Si, модифицированных ионами Cr<sup>+</sup>, Co<sup>+</sup>, W<sup>+</sup>.



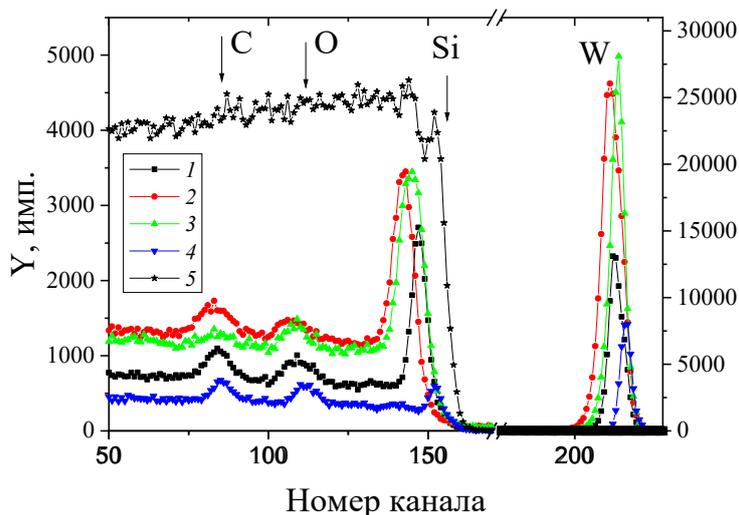
**Рисунок 1 – Энергетические спектры ОР ионов гелия с  $E = 1,5$  МэВ от кристаллов (100) Si, модифицированных ионно-ассистируемым осаждением Mo покрытий при ускоряющем напряжении: 1 – 7 кВ; 2 – 15 кВ; 3 – 20 кВ. 4 – исходный образец кремния**

Моделирование спектров РОР показало, что глубина проникновения хрома в кремний больше при ускоряющем напряжении 5 кВ, чем при ускоряющем напряжении 10 кВ. Это объясняется различием в значениях плотности энергии, выделенной (ПЭВ) в каскаде атомных столкновений при нанесении покрытия, которые составляли 0,42 эВ/атом для ускоряющего напряжения 5 кВ и 0,25 эВ/атом для 10 кВ. Аналогичная зависимость глубинного проникновения ионов в кремний от ПЭВ наблюдалась также и при ионно-ассистируемом осаждении кобальта, молибдена и вольфрама.

При уменьшении ускоряющего напряжения и увеличении времени модифицирования толщина покрытия растет. Так при ионно-ассистируемом осаждении хрома толщина покрытия составляет ~150 нм ( $U = 5$  кВ) и ~175 нм ( $U = 10$  кВ) при времени модифицирования 1 ч, увеличиваясь до ~320 нм ( $U = 5$  кВ) и до ~400 нм ( $U = 10$  кВ) при 6 ч модифицирования. Как следует из сравнения концентрационных профилей, снижение ускоряющего напряжения для ассистирующих ионов Cr<sup>+</sup> от 10 до 5 кВ приводит к уменьшению толщины покрытия при одинаковом времени модифицирования образцов кремния. Это

связано с различной интенсивностью процессов распыления осаждаемого покрытия при различных энергиях ассистирующих ионов и активацией миграционных процессов в результате управляемого энерговыделения в каскаде атомных столкновений при нанесении покрытия в условиях ассистирования ионами  $\text{Cr}^+$ .

Для изучения совершенства структуры кристаллов, дефектообразования в приповерхностных слоях ионно-имплантированных кристаллов кремния анализировались каналированные спектры РОР. На рис. 2 показаны энергетические осевые спектры обратного рассеяния кристаллов (100) Si, модифицированных нанесением W в условиях ионного  $\text{W}^+$  ассистирования. Осевой выход ориентированного спектра в области 130–160 каналов, связанный с повреждением в кристалле Si, растет с увеличением ускоряющего напряжения для ионов  $\text{W}^+$ , ассистирующих осаждение вольфрама.



**Рисунок 2 – Энергетические (100) осевые спектры ионов  $^4\text{He}$  с  $E=1,5$  МэВ от структур W-кремний, модифицированного нанесением W в условиях ассистирования ионами  $\text{W}^+$  при ускоряющем напряжении: 1 – 7 кВ; 2 – 15 кВ; 3 – 20 кВ. 4 – исходный W-кремний; 5 – случайный спектр кремния**

Изменение уровня деканалирования за пиком повреждений обнаруживает неоднозначную зависимость от энергии ионов  $\text{Co}^+$  и  $\text{W}^+$  (спектры 1–3, рис. 3). Наблюдается рост деканалирования с увеличением энергии ассистирующих ионов в системе W – Si и уменьшение в системе Co – Si. Этот факт может быть связан с формированием в кремнии дефектов структуры разного типа при облучении ионами  $\text{Co}^+$ ,  $\text{W}^+$ .

Характер повреждения на спектрах РОР каналированных ионов отражает тот факт, что структура кремния повреждается лишь в

начальный момент времени модифицирования образца, когда толщина осаждаемого покрытия меньше пробега ассистирующих ионов в материале покрытия. Слоевое содержание смещенных из узлов атомов в образцах кремния, модифицированных ионно-ассистируемым нанесением покрытий при различном времени модифицирования кристаллов Si, составляет  $5 \cdot 10^{16}$ – $8 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>. Ионно-ассистируемое осаждение покрытий на структуры металлическое (Co, Mo, W) покрытие – кремний, созданные предварительным вакуумным осаждением на кремний покрытий при  $U = 0$ , позволяет снизить дефектность в поверхностном слое кремния размером 30–40 нм.

В результате выполненной работы с применением метода РОР/К установлено, в состав получаемых покрытий на кремнии входят атомы осаждаемого металла (Cr, Co, Mo, W), технологических примесей углерода и кислорода из вакуумной камеры, а также Si в результате встречной диффузии из подложки в покрытие. Средняя скорость осаждения покрытия хрома при времени модифицирования 1 ч составляла 2,3–2,8 нм/мин и уменьшалась до значений 0,9–1,0 нм/мин при времени модифицирования 6 ч. Исследование дефектообразования в Si методом РОР/КИ показало, что концентрация дефектов в поверхностном слое кремния растет с увеличением энергии ассистирующих ионов  $Co^+$ ,  $Mo^+$  и  $W^+$ . Глубина максимальной концентрации дефектов сравнима с глубиной проникновения ионов с соответствующими энергиями в кремнии, и при этом максимум нарушений смещается в глубину кристалла с увеличением энергии ассистирующих ионов. Концентрация смещенных из узлов атомов кремния уменьшается в 1,7–3,7 раза при одинаковых условиях осаждения покрытия на кремний и на структуру металлическое покрытие – кремний. Установлено, что при сравнимых энергиях ионов, ассистирующих осаждение разных металлов на кремний концентрация дефектов в кремнии растет с ростом энергии, выделенной в каскаде атомных столкновений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bobrovich O. G., Mikhalkovich O. M., Tashlykov I. S. Composition and morphology of Ti and W coatings deposited on silicon during ion-beam assistance // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2015. – V. 6, – №. 3. – P. 229–233.

2. Бобрович О. Г., Ташлыкков И. С. Формирование на графите металлсодержащих покрытий в условиях ионного ассистирования // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 5-й Междунар. конф., Минск, 6–9 окт. 2003 г., БГУ. Минск, – 2003. – С. 326–328.*

УДК 621.793:539.234:539.534.9

В.В. Поплавский, доц., канд. физ.-мат. наук;  
О.Г. Бобрович, доц., канд. физ.-мат. наук;  
А.В. Дорожко, доц., канд. техн. наук;  
В.Г. Матыс, доц., канд. хим. наук  
(БГТУ, г. Минск)

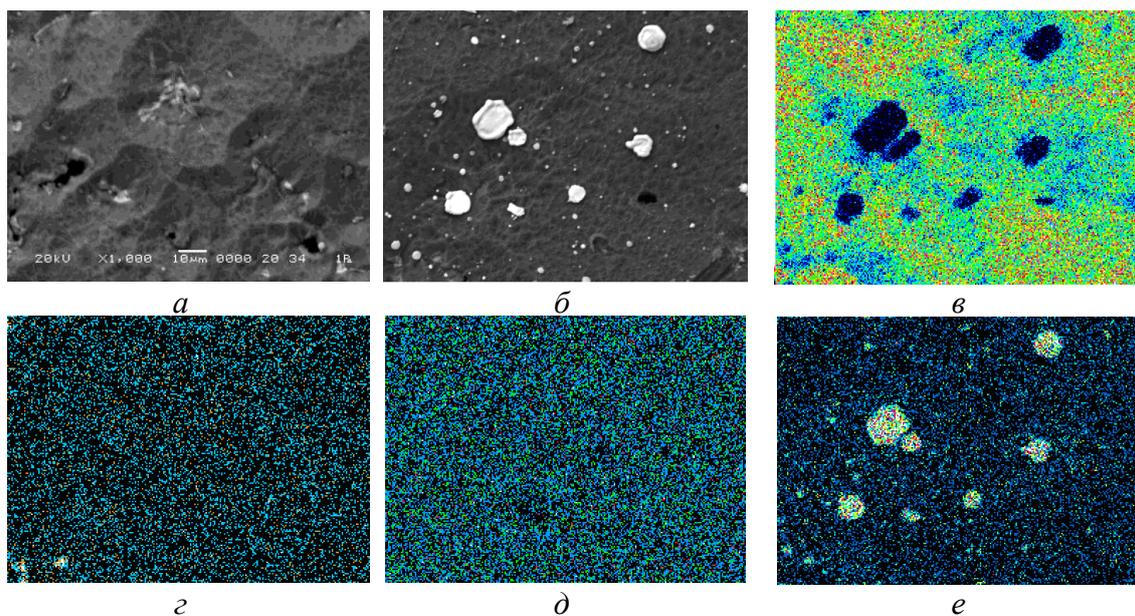
## **МИКРОСТРУКТУРА И СОСТАВ СЛОЕВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16 В ПРОЦЕССЕ ИОННО-АССИСТИРУЕМОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ**

Вследствие образования на поверхности алюминия и его сплавов в атмосферных условиях стабильной и плотной оксидной пленки толщиной  $\sim 10$  нм материалы обладают химической инертностью и могут, в частности, применяться в качестве электродов и основы электрокатализаторов электрохимических устройств – топливных элементов и электролизеров получения водорода. В условиях работы таких устройств исходной коррозионной стойкости материалов зачастую недостаточно. Для достижения необходимых свойств требуется модифицирование поверхности материалов с целью формирования устойчивых к коррозии и каталитически активных слоев, что может быть осуществлено посредством легирования ускоренными ионами металлов.

Формирование легированных металлами слоев осуществляли методом ионно-ассистируемого осаждения металлов в режиме, при котором в качестве ассистирующих процессу осаждения используются ионы осаждаемого металла. Осаждение металла и перемешивание осаждаемого слоя с поверхностным слоем подложки ускоренными ( $U = 10$  кВ) ионами того же металла проводили в экспериментальной установке, соответственно, из нейтральной фракции пара и плазмы вакуумного ( $\sim 10^{-2}$  Па) дугового разряда, возбуждаемого в парах осаждаемого металла, ионного источника [1]. Исследуемые слои формировали на поверхности образцов из алюминиевых сплавов Д16 и Д16Т, а также из алюминия марки А7 осаждением хрома, циркония и церия.

Анализ микроструктуры и элементного состава исследуемых слоев проведен методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа с применением микроскопа JSM-5610LV и спектрометра EDX JED-2201 (JEOL). Элементный состав слоев и распределение атомов компонентов по толщине исследованы также методом спектрометрии резерфордовского рассеяния с применением ускорительного комплекса AN-2500 (High Voltage Engineering Europe).

В процессе ионно-лучевой обработки микроструктура сплавов не претерпевает существенных изменений; морфология поверхности лишь несколько изменяется за счет ионно-ассистированного осаждения металла (рис. 1). Для сплава характерна кристаллическая структура с размером зёрен  $\sim 10$  мкм. На поверхности имеются кластеры размером порядка нескольких микрометров, наличие которых обусловлено осаждением капель металла из ионного источника. В частности отчетливо наблюдается характерная при осаждении церия каплевидная фаза (рис. 1б,е). Осаждение металлов, и в частности церия, проводилось с целью исследования возможности повышения коррозионной устойчивости сплавов, поскольку соединения редкоземельных металлов, и чаще всего церия, широко исследуются как альтернатива хроматам для пассивации алюминия и его сплавов, обеспечивая высокие защитные свойства формируемых гальванических конверсионных покрытий [2]. Интенсивность осаждения капель и их размеры зависят от рода осаждаемого металла; наиболее интенсивно идет процесс при осаждении церия, а также легкоплавких металлов, таких как олово, свинец. Капли имеются при осаждении любых металлов, в т.ч. и тугоплавких.



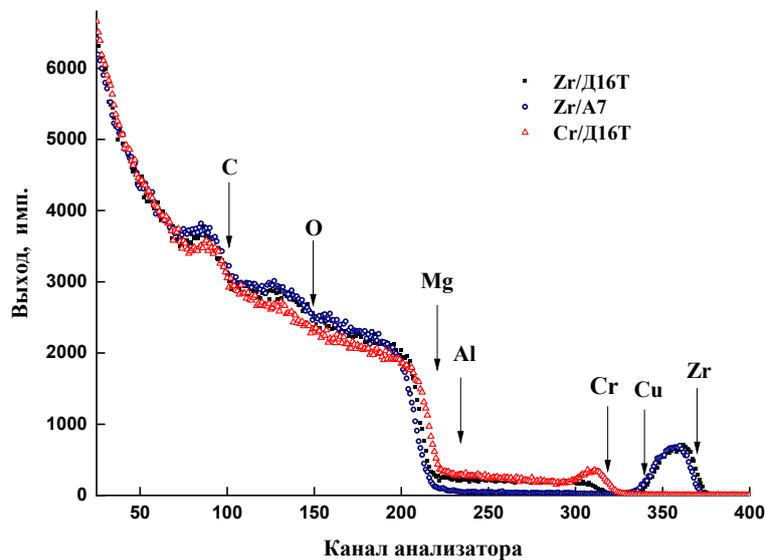
*a, б* –  $\times 1000$ ; *в* – Al; *г* – Cu; *д* – Mg; *е* – Ce

**Рисунок 1 – Электронно-микроскопические снимки участка поверхности образца сплава Д16 до (*a*) и после (*б*) ионно-ассистированного осаждения церия, и распределение элементов (Al, Cu, Mg, Ce) по поверхности образца**

По данным энергодисперсионного анализа в составе исследуемых поверхностей содержатся атомы осаждаемых металлов и компонентов самого сплава, кислорода оксидной пленки на их поверхности, а также углерода. Содержание осажденных металлов невелико и составляет несколько процентов. Кислород входит в состав поверхностной оксидной пленки и сорбируется из остаточной атмосферы ваку-

умной камеры. Источником углерода является сорбция углеводородов – компонентов рабочей жидкости вакуумных насосов. Атомы легирующего элемента в составе слоя распределены по поверхности за исключением капельной фазы практически равномерно.

Результаты исследований элементного состава и распределения атомов элементов по толщине формируемых слоев, полученные с применением спектрометрии Резерфордского обратного рассеяния, представлены в виде спектров на рис. 2. Вертикальными стрелками на спектрах указаны номера каналов анализатора, соответствующие значениям энергии анализирующих ионов гелия  $^4\text{He}$ , претерпевших рассеяние на ядрах атомов элементов, расположенных на поверхности образцов.



**Рисунок 2 – Спектры Резерфордского рассеяния ионов  $^4\text{He}$  ( $E_0 = 1,3 \text{ МэВ}$ ) на ядрах атомов элементов, входящих в состав слоев, сформированных на поверхности алюминия А7 и алюминиевого сплава Д16Т в процессе осаждения циркония и хрома**

Анализ расположения сигналов рассеяния в спектрах от поверхности образцов свидетельствует о том, что атомы алюминия и компонентов сплава Д16Т (Al, Mg, Cu) не выходят на поверхность и исследуемые слои формируются в основном в оксидной пленке на поверхности. Содержание атомов этих металлов в слоях составляет  $\sim 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , в то время как содержание атомов каждого из осажденных металлов –  $\sim (1-4) \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ . Содержание в слоях атомов легких элементов значительное: кислорода –  $\sim (1-2) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , углерода –  $\sim (5-7) \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Толщина формируемых слоев составляет  $\sim 50 \text{ нм}$ .

Таким образом, в процессе ионно-ассистированного осаждения металлов из плазмы вакуумного дугового разряда сформированы мно-

гокомпонентные аморфные слои толщиной до ~50 нм, включающие атомы осажденного металла, компонентов подложки, в т.ч. кислород оксидной пленки, и примеси углеводородов. Захват значительного количества газов из остаточной атмосферы вакуумной рабочей камеры и включение их в состав формируемого слоя имеют место при осаждении на поверхность алюминия, а также и других вентильных металлов (титана, тантала) и их сплавов переходных металлов, обладающих геттерными свойствами, таких как Cr, Zr, Ce и др. [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Poplavsky V. V., Mishchenko T. S., Matys V. G. Composition and Electrocatalytic Properties of the Coatings Formed by the Ion-Beam-Assisted Deposition of Platinum from a Pulsed Arc-Discharge Plasma onto Aluminium // *Technical Physics*. – 2010. – Vol. 55, № 2. – P. 296–302.

2. Becker M. Chromate-Free Chemical Conversion Coatings for Aluminum Alloys // *Corrosion Reviews*. – 2019. – V. 37, № 4. – P. 321–342.

3. Poplavsky V. V., Bobrovich O. G., Dorozhko A. V., Matys V. G. Features of Layer Formation on the Surface of Valve Metals in the Process of the Ion-Beam-Assisted Deposition of Metals from Vacuum-Arc Discharge Plasma // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* – 2024. – V. 18, № 5. – P. 1065–1071.

УДК 535.343

Ю.И. Миксюк, доц., канд. физ.-мат. наук(БГТУ, г. Минск);

И.Г. Даденков, асп. (БГУ, г. Минск);

К.А. Саечников, доц., канд. физ.-мат. наук(БГПУ, г. Минск);

А.Л. Толстик, канд. физ.-мат. наук; с.н.с., (БГУ, г. Минск)

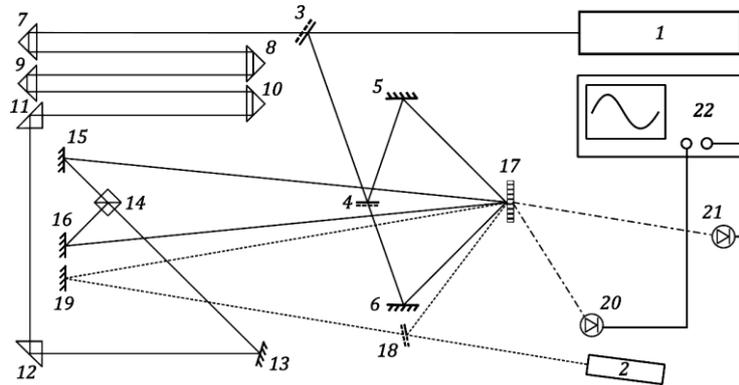
#### **МУЛЬТИПЛЕКСНАЯ ЗАПИСЬ И ДИНАМИКА РЕЛАКСАЦИИ РЕШЕТОК В ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Фоторефрактивные кристаллы семейства силленитов обеспечивают возможность многократной динамической записи информации с использованием как непрерывного, так и импульсного лазерного излучения в видимом спектральном диапазоне, чем вызывают неизменный интерес у исследователей [1, 2]. Такие кристаллы рассматриваются перспективными для реализации систем голографического контроля и диагностики микроструктурированных объектов. Одним из важных и существенных преимуществ фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов является тот факт, что запись и релаксация динамических голографических решеток осуществляется в реальном времени в диапа-

зоне от сотен микросекунд до секунд. Указанная динамика решеток создает возможности многократной повторной записи (перезаписи) голограмм, использования данных кристаллов в голографических системах записи и обработки информации, а также в адаптивных интерферометрах, например, для регистрации колебаний на уровне ангстрем [3, 4].

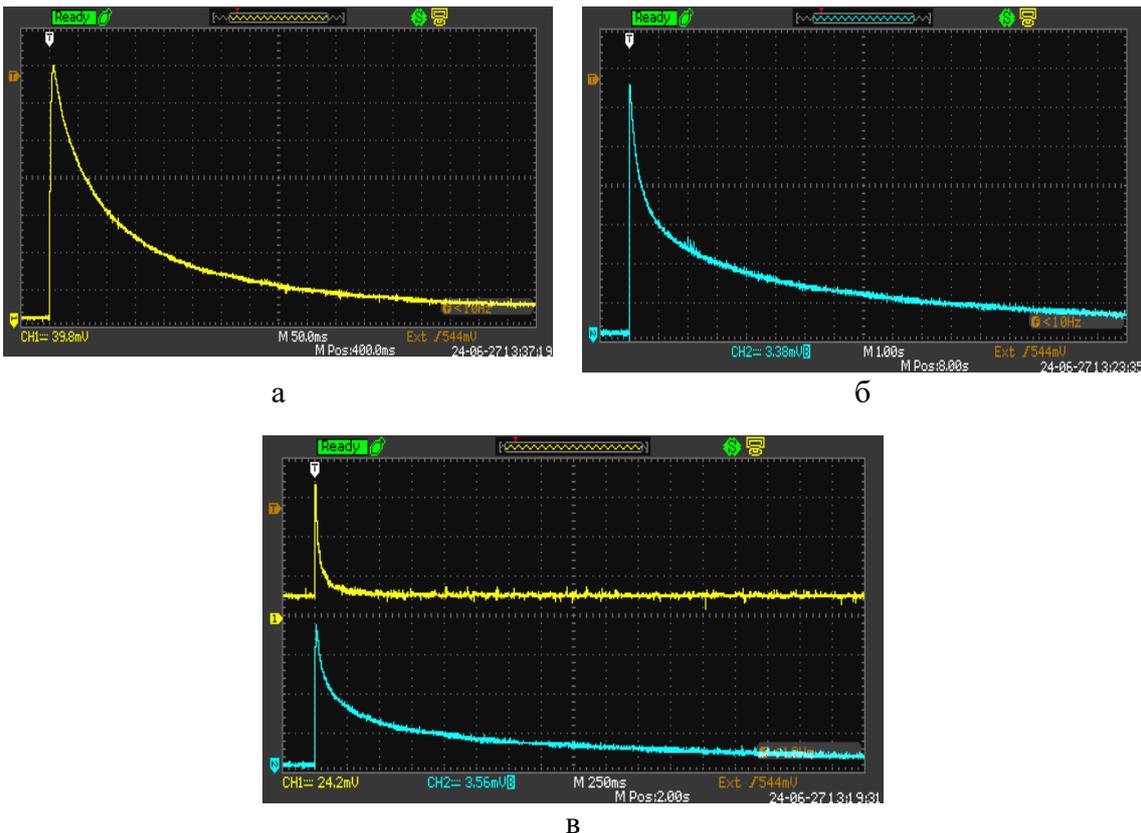
В данной работе приведены результаты сравнительного анализа кинетических параметров записанных с использованием фоторефрактивных кристаллов семейства силленитов при импульсном лазерном возбуждении решеток с разными периодами и выполнена оценка влияния перекрестной записи нескольких решеток в одной пространственной области кристалла. Для проведения экспериментальных исследований, голографического контроля и диагностики микроструктурированных объектов была разработана экспериментальная установка на базе импульсного Nd:YAG лазера 1 с  $\lambda = 532$  нм и непрерывного полупроводникового лазера 2 с  $\lambda = 660$  нм, схема которой приведена на рис. 1. Для описания работы установки ее удобно разделить на четыре части: система записи решетки с малым периодом, система задержки, система записи решетки с большим периодом и система считывания. В систему записи решетки с малым периодом входит полупрозрачное зеркало 3, которое разделяет луч между системами, полупрозрачное зеркало 4, разделяющее луч на два луча, которые зеркалами 5 и 6 сводятся на кристалл и записывают динамическую решетку. В систему задержки входят призмы 7 – 11, выбор расстояния между которыми позволяет манипулировать задержкой между импульсами, приходящими на кристалл и формирующими динамические решетки. Для достижения необходимой задержки эта система может состоять из любого количества призм, а также может реализовываться при помощи зеркал или других элементов, позволяющих создавать временную задержку. Система записи решетки с большим периодом состоит из призм 11, 12 и зеркала 13, которые нужны для правильного позиционирования луча, чтобы, пройдя через делительный кубик 14, полученные пучки зеркалами 15 и 16 свести на кристалл 17 под необходимым углом. Система считывания состоит из полупроводникового лазера 2 с длиной волны, отличающейся от записывающей динамические решетки, полупрозрачного зеркала 18 и глухого зеркала 19, установленных таким образом, чтобы выполнялось условие Брэгга для зондирующего излучения. В результате дифракции зондирующего излучения на сформированных решетках возникают новые лучи, кинетика возникновения и исчезновения которых напрямую связана с кинетикой формирования и релаксации динамических голограмм. Регистрация наблюдаемых кинетик осуществляется при помощи фотоприемных

устройств 20 и 21, подключенных к цифровому осциллографу 22.



**Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки**

Для оценки влияния мультиплексирования на амплитудные и временные характеристики решеток сначала записывались решетки с разными периодами по отдельности, а затем совместно, что позволяло проследить отличия. Характерные осциллограммы приведены на рис 2.



**Рисунок 2 – Осциллограммы дифрагированных сигналов на решетках при одиночной записи с периодом:  $\Lambda = 5$  мкм (а),  $\Lambda = 500$  нм (б), и при мультиплексной записи обеих решеток (в)**

На рисунке 2 (а) масштаб составляет 50 мс на клетку, а на рисунке 2 (б) - 1с на клетку. В условиях мультиплексной записи дифрагиро-

ванные сигналы регистрировались одновременно, поэтому был выбран масштаб 250 мс на клетку.

Результаты показывают, что решетка с большим периодом релаксирует быстрее, при этом динамика релаксации не описывается простой экспоненциальной функцией. Удовлетворительное соответствие имеет место при использовании модели, включающей заселение и релаксацию электронов с двух подуровней, описываемых экспоненциальной и гиперболической функциями [5].

Проведенные исследования времени релаксации обеих решеток от интенсивности записывающего излучения показывают одинаковую динамику с ростом интенсивности записывающего излучения, независимо от того, была ли записана одна решетка или же две. Однако, для решетки с периодом 500 нм времена релаксации в случае мультиплексирования уменьшаются более значительно, чем в случае решетки с большим периодом.

Такое существенное уменьшение связано с тем, что в случае эксперимента решетка с большим периодом записывалась поверх решетки с меньшим, а общая тенденция уменьшения связана со сложной пространственной картиной перераспределения зарядов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко, – СПб: Наука, – 1992. – 320 с.

2. Shandarov S.M. Dynamic Denisyuk holograms in cubic photorefractive crystals / S.M. Shandarov, N.I. Burimov, Yu.N. Kul'chin, R.V. Romashko, A.L. Tolstik, V.V. Shepelevich // Quantum Electronics. – 2008. – V. 38, – №.11. – P. 1059–1069.

3. Ромашко Р.В. Адаптивная голографическая интерферометрия: техника, прогресс и приложения / Р.В. Ромашко // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 40–47.

4. Peigne A. Adaptive Interferometry for High-Sensitivity Optical Fiber Sensing / A. Peigne, U. Bortolozzo, S. Residori, S. Molin, V. Billault, P. Nouchi, D. Dolfi, J. Huignard // J. Lightwave Technol. – 2016. – V. 34. – P. 4603–4609.

5. Толстик А.Л. Динамика фотоиндуцированного поглощения в кристаллах титаната висмута / А.Л.Толстик, Х.К.Хайдер // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2012. – № 2. – С.3–7.

**КИНЕТИКА АДсорбЦИОННО-РЕЗИСТИВНОГО ОТКЛИКА  
НА ДИОКСИД АЗОТА ПЛЕНОК КОМПЗИТА  
ФТАЛОЦИАНИН МЕДИ – ПОЛИСТИРОЛ**

Пленки фталоцианинов и композитов на их основе могут быть использованы при разработке сенсоров диоксида азота, однако одной из нерешенных проблем является медленный отклик чувствительного слоя, что делает их неконкурентными по сравнению с адсорбционно-резистивными сенсорами на основе окислов металлов. Целью данной работы является изучение кинетики адсорбционно-резистивного отклика на диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) пленок композита фталоцианин меди – полистирол ( $\text{CuPc-PS}$ ) и анализ кинетических кривых адсорбционно-резистивного отклика с использованием статистической теории адсорбции.

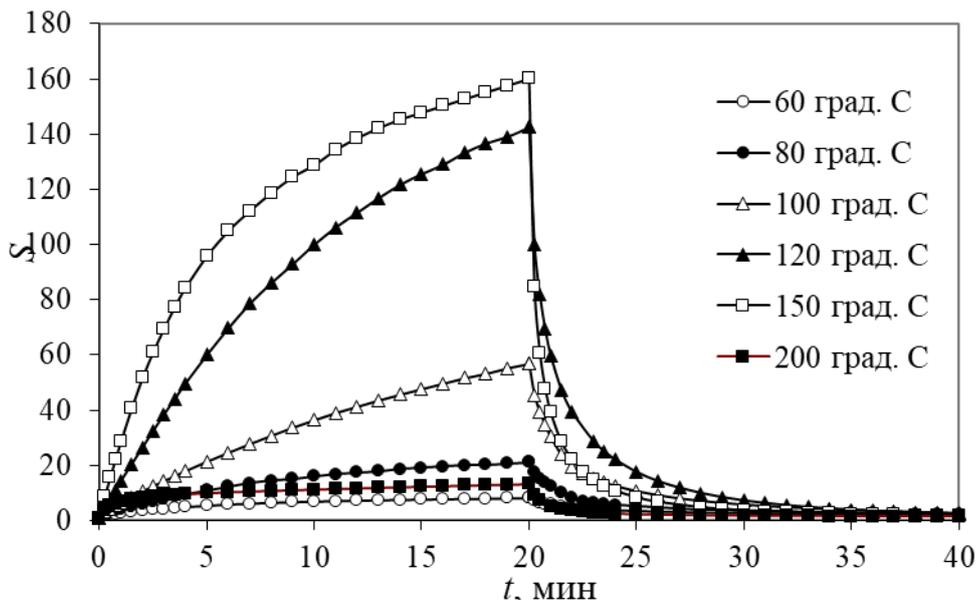
Пленки композита  $\text{CuPc-PS}$  осаждались методом лазерного распыления в вакууме из мишени состава: 20% фталоцианин меди, 80% полистирол. Осаждение производилось на поликорковые подложки со встречно-штыревой системой никелевых электродов. Температура подложек в процессе осаждения была комнатной, их толщина контролировалась кварцевым резонатором и составила порядка 100 нм.

Проводимость композитных пленок  $\text{CuPc-PS}$  измерялась методом вольтметра-амперметра при напряжении между электродами подложки 30 В, что при расстоянии между электродами 50 мкм обеспечивало напряженность электрического поля 0,6 МВ/м. Напряжение в цепи создавалось стабилизированным источником питания, ток в цепи измерялся электрометром В7Э-42. Температура образца поддерживалась с погрешностью не более 0,1 °С.

При измерении адсорбционно-резистивного отклика через измерительную камеру поочередно с постоянной скоростью пропускались либо воздух, либо воздух с примесью  $\text{NO}_2$ . Скорость прокачки газовой смеси составляла 0,5 л/мин, что при объеме измерительной камеры 0,15 л обеспечивало замену газовой смеси за время порядка 20 с. Диффузионный источник  $\text{NO}_2$ , применявшийся для приготовления газовой смеси, имел скорость диффузии 1,7 мкг/мин, что обеспечивало концентрацию диоксида азота в воздухе 3,4 мкг/л или 1,8 ppm. Адсорбционно-резистивный отклик характеризовался относительным изменением проводимости  $S$ , которое определяется как отношение проводимости пленки в присутствии  $\text{NO}_2$  к исходной проводимости

пленки.

На рис. 1 представлены кинетические кривые адсорбционно-резистивного отклика на диоксид азота пленок композита CuPc – PS, измеренные при температурах 60, 80, 100, 120, 150 и 200 °С. По мере возрастания температуры от 60 до 150 °С происходит постепенное увеличение относительного отклика  $S$ , однако увеличение температуры до 200 °С приводит к очень сильному спаду величины  $S$ .



**Рисунок 1 – Кинетические кривые адсорбционно-резистивного отклика на диоксид азота пленок композита CuPc–PS**

Статистическая теория химической адсорбции [1] рассматривает поверхность твердого тела состоящей из огромного числа участков, отличающихся друг от друга теплотой адсорбции  $Q$  и энергиями активации адсорбции  $E_a$  и десорбции  $E_d$ . В самом общем случае соотношение между этими величинами имеет вид

$$Q = E_d - E_a. \quad (1)$$

Скорость заполнения адсорбатом участков поверхности, характеризующихся некоторыми определенными значениями  $Q$ ,  $E_a$  и  $E_d$ , может быть задана следующим образом

$$\frac{d\theta}{dt} = K_a P(1 - \theta) - K_d \theta, \quad (2)$$

где  $\theta$  – доля участка поверхности, заполненная адсорбатом;  $P$  – давление адсорбата;  $K_a$  и  $K_d$  – константы скорости адсорбции и десорбции, соответственно, которые зависят от температуры  $T$

$$K_a = K_{0a} e^{-\frac{E_a}{kT}}, \quad (3)$$

$$K_d = K_{0d} e^{-\frac{E_d}{kT}}, \quad (4)$$

где  $K_{0a}$  и  $K_{0d}$  – константы;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Для получения кинетических изотерм необходимо решить дифференциальное уравнение (2) для участка поверхности с определенными значениями  $Q$ ,  $E_a$  и  $E_d$ . Для процесса десорбции при условии, что давление  $P$  равно нулю, получаем

$$\theta = \theta_0 \exp(-K_d t), \quad (5)$$

где  $\theta_0$  – это степень заполнения участка поверхности адсорбатом в начальный момент времени  $t = 0$ .

Анализ показывает, что при теплоте адсорбции выше  $Q_{1/2} = kT \ln(K_0/P)$  равновесная доля заполнения участка поверхности  $\theta_0$  может быть принята равной 1, а при меньшей теплоте адсорбции – нулю, причем переход от значений  $\theta_0$  близких к нулю к значениям  $\theta_0$  близким к 1 происходит в сравнительно узком интервале теплот адсорбции  $4kT$  [2]. Похожим образом ведет себя величина  $\exp(-K_d t)$ : она претерпевает резкое изменение от значений близких к нулю до значений близких к 1 в относительно узком интервале энергий активации десорбции  $ekT$  в окрестности энергии  $E_{1/e} = kT \ln(K_{0d} t)$ , соответствующей доле заполнения  $\theta/\theta_0 = 1/e$ .

Исходя из этого, доля заполнения всей поверхности  $x$  в некоторый момент времени  $t$  может быть приближенно рассчитана следующим образом

$$x = \int_{kT \ln(K_{0d} t)}^{E_{\max}} \rho(E_d) dE_d, \quad (6)$$

где  $\rho(E_d)$  – функция распределения участков поверхности по энергиям активации десорбции. В этом приближении все участки поверхности с энергиями активации меньше  $E_{1/e}$  считаются свободными от адсорбата, а с энергиями активации большими  $E_{1/e}$  – заполненными полностью.

При равномерном распределении участков поверхности по энергиям активации десорбции  $\rho(E_d) = H_d$ , и тогда кинетическая изотерма десорбции примет вид

$$x = H_d E_{d \max} - H_d kT \ln K_{0d} - H_d kT \ln t, \quad (7)$$

что согласуется с часто наблюдаемой на опыте кинетической изотермой Рогинского–Зельдовича–Еловича

$$a = B \ln t + C, \quad (8)$$

где  $a$  – количество адсорбированного вещества к моменту времени  $t$ ;  $B$  и  $C$  – константы.

На рис. 2 представлены кинетические кривые адсорбционно-резистивного отклика пленки CuPc-PS на диоксид азота в координатах  $S - \ln(t)$  при температурах измерения 60, 80, 100, 120, 150 и 200°C. По мере увеличения температуры измерения от 60°C до 120°C наклон линейных участков кинетических изотерм возрастает, т.е. процесс восстановления становится быстрее. Это качественно согласуется с уравнением (7), но количественного согласия не наблюдается, так как наклон изотерм растет с увеличением температуры суперлинейно. При температуре измерения 200°C происходит резкое уменьшение наклона кинетической кривой десорбции, что может быть связано с перекристаллизацией фталоцианина меди в полимерной матрице.

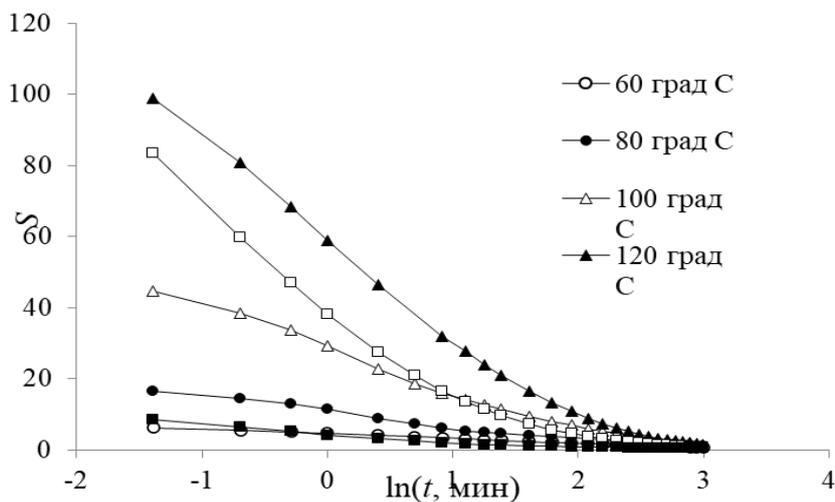


Рисунок 2 – Кинетические кривые адсорбционно-резистивного отклика на диоксид азота пленок композита CuPc-PS

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рогинский С. З. Гетерогенный катализ: Некоторые вопр. теории / Москва : Наука, 1979. - 416 с.
2. Мисевич А.В. Влияние неоднородности пленок на основе фталоцианинов на их адсорбционно-резистивные свойства // Информационные технологии: материалы 89-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3–18 февраля 2025 года [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т ; отв. за издание И.В. Войтов. – Минск : БГТУ, 2025. – С. 347–350.

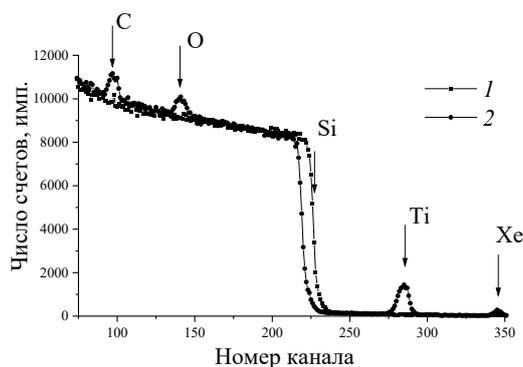
**КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ  
СЛОЕВ СТРУКТУР, ПОЛУЧЕННЫХ ИОННО-  
АССИСТИРУЕМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ АТОМОВ ТИТАНА  
И КОБАЛЬТА НА КРЕМНИИ С КСЕНОНОВЫМ МАРКЕРОМ**

На первом этапе в приповерхностные слои подготовленных образцов из кремния были внедрены атомы ксенона методом ионной имплантации. Энергия ионов  $\text{Xe}^+$  составляла  $E = 40$  кэВ, давление в вакуумной камере при имплантации было  $4 \cdot 10^{-4}$  Па. Ксеноновый маркер применялся для установления границы раздела покрытие/подложка [1]. На втором этапе на образцы кремния с ксеноновым маркером наносились покрытия на основе Ti и Co методом ионно-ассистируемого осаждения в вакууме. Осаждение покрытия осуществлялось при ускоряющих напряжениях ассистирующих ионов 7 кВ и плотности ионного тока  $\sim(4-5)$  мкА/см<sup>2</sup>, время осаждения покрытий составляло 2 и 4 часа, средняя скорость нанесения покрытия находилась в пределах 0,2–0,5 нм/мин. Отношение плотности потока  $J_i$  ассистирующих ионов к плотности потока  $J_a$  нейтральных атомов составляло  $J_i / J_a = 0,1-0,4$ , что соответствует условию роста покрытия на подложке. В рабочей камере в процессе осаждения покрытий поддерживался вакуум при давлении  $\sim 10^{-2}$  Па.

Послойный элементный анализ проводился методом резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия в сочетании с компьютерным моделированием RUMP. Определения содержания водорода в полученных структурах было проведено с помощью метода ядерных реакций (ЯР). Для этого использовалась резонансная ядерная реакция при взаимодействии ионов азота с водородом  ${}^1\text{H}({}^{15}\text{N}, \alpha\gamma){}^{12}\text{C}$ . Распределение водорода по глубине было определено при изменении энергией ионов  $\text{N}^+$  в пучке в интервале 6380–7000 МэВ через 10 кэВ в зависимости от толщины анализируемого слоя. Преобразование шкалы энергии  $\text{N}^+$  в шкалу глубины было сделано, используя тормозную способность ионов азота, полученную с помощью программы TRIM на основании состава покрытий, смоделированного по данным РОР.

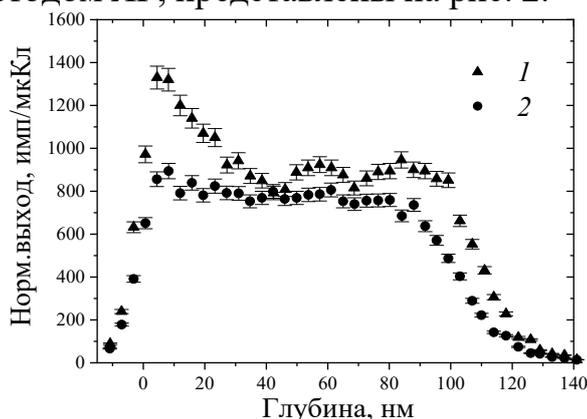
Анализ спектров РОР показал, что на поверхности образцов формируется покрытие, в состав которого входят помимо атомов осаждаемого металла (Ti, Co), атомы технологических примесей углерода и кислорода (рис. 1) [2, 3]. Моделирование экспериментальных спектров РОР с применением компьютерной программы RUMP показало,

что в приповерхностных слоях должны присутствовать атомы водорода.



**Рисунок 1 – Спектры РОР ионов гелия от образца кремния с Хе маркером до (1) и после осаждения атомов Ti (2)**

Так как метод РОР не позволяет обнаружить атомы водорода в образцах, нами использовался для этого метод ЯР. Профили распределение атомов водорода по глубине в образце после осаждения атомов Со, полученные методом ЯР, представлены на рис. 2.



**Рисунок 2 – Распределение атомов водорода по глубине в образце кремния с Хе маркером после осаждения атомов Со  
1 – 1-е сканирование поверхности, 2 – 5-е сканирование поверхности**

Результаты эксперимента с использованием ЯР подтверждают данные моделирования RUMP о наличии водорода в сформированных покрытиях. В исходных образцах кремния атомы водорода не были обнаружены. Это указывает на тот факт, что атомы водорода появляются в приповерхностных слоях в процессе ионно-ассистированного осаждения. Источником водорода в покрытиях, как кислорода и углерода, также, на наш взгляд, является летучая фракция углеводородов вакуумного масла диффузионного паромасляного насоса.

При последующих воздействиях анализирующим пучком ионов  $N^+$  на поверхность образцов слоевая концентрация ( $Nt$ ) атомов водо-

рода уменьшается, а после 4 или 5-го сканирования практически не изменяется и становится равной согласно данным эксперимента  $\sim 1,56 \cdot 10^{17}$  ат/см<sup>2</sup> для Co/Si-структуры и  $\sim (1,23-1,5) \cdot 10^{17}$  ат/см<sup>2</sup> для Co/(Si+Xe)-структур (табл.).

**Таблица – Содержание водорода в образцах кремния при различном времени осаждения покрытия  $t$**

Структура	$t$ , ч	Номер сканирования	Глубина слоя, нм	$n$ , ат/см <sup>3</sup>	$(Nt)$ , см <sup>-2</sup>	C, ат. %
Co/(Si+Xe)	2	1	152,7	$1,14 \cdot 10^{22}$	$1,75 \cdot 10^{17}$	16,38
		5		$0,81 \cdot 10^{22}$	$1,23 \cdot 10^{17}$	11,51
	4	1	179,6	$1,41 \cdot 10^{22}$	$2,90 \cdot 10^{17}$	20,18
		5		$0,73 \cdot 10^{22}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	10,44
Ti/(Si+Xe)	2	1	152,7	$1,05 \cdot 10^{22}$	$1,60 \cdot 10^{17}$	15,0
		5		$0,98 \cdot 10^{22}$	$1,50 \cdot 10^{17}$	14,0
	4	1	152,7	$1,33 \cdot 10^{22}$	$2,02 \cdot 10^{17}$	19,0
		5		$0,78 \cdot 10^{22}$	$1,19 \cdot 10^{17}$	11,2

При последующих воздействиях на поверхность образцов анализирующим пучком ионов N<sup>+</sup> слоевая концентрация ( $Nt$ ) атомов водорода уменьшается, а после 4 или 5-го сканирования практически не изменяется и становится равной согласно данным эксперимента  $\sim (1,2-1,5) \cdot 10^{17}$  ат/см<sup>2</sup> (табл.). Уменьшение концентрации водорода в приповерхностных слоях структур под воздействием анализирующего пучка можно объяснить дегазацией атомов водорода, которые оказались химически слабо связаны с другими атомами покрытия. Следует отметить, что дегазация атомов водорода более интенсивно происходит в структурах Co/(Si+Xe).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Изучение ядерно-физическими методами металлосодержащих (Ti, Co)-покрытий, осажденных методом ионного ассистирования на кремний / О. Г Бобрович [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2006. – №1. – С. 54–58.
2. Тульев В. В. Влияние ионно-ассистируемого осаждения металлосодержащих покрытий на содержание водорода в Cr/Si-, Ti/Si- и Zr/Si-структурах // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. –2020. – № 2 (236). – С. 85–88
3. Тульев В. В. Изучение поверхности структур металл / кремний, полученных ионно-ассистируемым осаждением покрытий в вакууме // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – 2024. – № 2 (284). – С. 31–37.

Н.В. Тарасенко, канд. физ.-мат. наук, зав. центром  
(ИФ НАН Беларуси, г. Минск);  
А.В. Буцень, ассист. (БГТУ, г. Минск)

## **ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ В ЖИДКОСТИ.**

Для решения задач лазерного спектрального анализа, а также для получения наноразмерных частиц методом лазерной абляции [1,2] применение двойных лазерных импульсов оказалось очень эффективным. В частности, было показано, что в двухимпульсном режиме скорость образования частиц выше, чем в режиме одноимпульсной абляции при том же количестве лазерных импульсов. Временной интервал между двойными импульсами определяется временем жизни газового пузыря и обычно лежит в диапазоне от 5 до 100 мкс.

**Экспериментальная установка.** Материал мишени аблировали и возбуждали двухимпульсным Nd:YAG-лазером с модуляцией добротности (модель LS 2131D, LOTIS ТП). Длительность и максимальная энергия каждого импульса составляли 10 нс и 100 МДж соответственно. Задержка между импульсами могла варьироваться от 0 до 120 мкс. Лазерное излучение фокусировалось кварцевым конденсором на мишень, расположенную в заполненной жидкостью кювете с кварцевыми окнами. Ортогональное поперечное сечение плазмы, образовавшейся вблизи поверхности мишени, проецировалось на щель спектрографа GMS-850 (фокусное расстояние 850 мм, решетка 600 линий/мм, щель 50 мкм). Образец цинкового сплава с известным составом (мас. %) в качестве мишени использовали Zn (83,4%), Cu (8,19%), Al (7,78%), Mg (0,76%), Fe (0,14%). Диагностика плазмы, генерируемой лазерным излучением на мишени, погруженной в жидкость, проводилась с использованием комбинации методов. Электронную концентрацию  $N_e$  определяли с использованием линии магния (Mg I 518,4 нм), которая расширена из-за квадратичного эффекта Штарка. Температуру оценивали по графику Больцмана для спектральных линий меди в диапазоне 510,5 - 529,2 нм, а также по отношению интенсивностей двух спектральных линий с низкой вероятностью реабсорбции (Zn I 307,2 и Zn I 307,6 нм). Экспериментально установленные значения концентрации электронов и температуры плазмы послужили основой для оценки концентрации компонентов материала мишени с использованием безэталонного метода LIBS.

**Определение параметров лазерной плазмы в воде.** Интегрированный по времени спектр плазмы, образующийся при воздействии

на мишень лазерного излучения в двухимпульсном режиме, зависит от длительности интервала  $\tau$  между ними. Когда мишень находилась под водой, эксперименты проводились со временем задержки  $\tau$ , равным 10, 25, 40, 50, 60, 75, 100, и 120 мкс. При первых двух указанных значениях  $\tau$  наблюдался очень интенсивный спектр непрерывного излучения, что затрудняло измерение интенсивности спектральных линий. По этой причине анализ спектров плазмы проводился с временными задержками между импульсами от 40 до 120 мкс

Количественными характеристиками свойств плазмы (в зависимости от  $\tau$ ) являются температура и концентрация электронов. Эти параметры были определены на основе анализа интенсивности и ширины спектральных линий, измеренных интегрально, без учета их изменений в процессе эволюции импульсного плазменного столба.

Параметры плазмы (температура и концентрация электронов), полученные с использованием вышеуказанных методов диагностики, приведены в таблице 1. Следует отметить, что значения температуры, определяемые группой медных линий с изменением  $\tau$ , практически не изменяются. Расхождения между значениями температуры, рассчитанными по линиям цинка Zn I 307,2 нм и Zn I 307,6 нм, несколько больше, что в определенной степени можно объяснить большей погрешностью измерения из-за сравнительно низкой интенсивности этих линий. Тем не менее, следует признать, что соответствие между значениями температуры, установленными атомными линиями двух различных элементов, является вполне удовлетворительным.

**Таблица 1 – Значения температуры и концентрации электронов в плазме при двухимпульсной абляции мишени в воде**

	$\lambda$ , нм	Временной сдвиг, мкс					
		40	50	60	75	100	120
$T_e$ , эВ	Группа линий меди (510,5 – 529,2 нм)	0,73	0,73	0,71	0,69	0,71	0,70
	Zn I 307,2 / Zn I 307,6	0,66	0,67	0,72	0,72	0,70	–
$N_e$ , $10^{17}$ см <sup>-3</sup>	$H_\alpha$ (FWHM)	6,7	5,8	4,4	3,6	2,6	2,5
	Mg I 518,4 (FWHM)	–	1,0	0,85	0,73	0,77	–

Стоит отметить, что значения концентрации электронов, определенные по ширине линии  $H_\alpha$ , значительно завышены из-за самопоглощения и могут служить лишь ориентиром. Следовательно, были приняты во внимание значения  $N_e$ , рассчитанные на основе ширины линии Mg I 518,4 нм.

#### **Оценка стехиометрического состава лазерно-индуцирован-**

**ной плазмы в воде.** Метод LIBS основан на известной зависимости интенсивности  $I$  спектральной линии

$$I = \frac{hc}{\lambda_0} A_{ij} g_i \frac{FC_z}{U_z} \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $h$  - постоянная Планка,  $c$  - скорость света,  $\lambda_0$  - длина волны центра линии,  $A_{ij}$  - вероятность самопроизвольного перехода с верхнего уровня  $i$ ;  $g_i$  и  $E_i$  - статистический вес и энергия  $i$ -го уровня,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура плазмы;  $C_z$  - концентрация атомов  $z$  компоненты (химического элемента) в плазме,  $U$  - сумма по состояниям атомов  $z$  компонента,  $F$  - безразмерный коэффициент, учитывающий: объем плазмы, телесный угол сбора излучения, время регистрации излучения, потери света при регистрации и эффективность детектора системы регистрации.

Полученные значения интенсивностей спектральных линий атомов, а также температура, определяемая по группе линий меди в зеленой области спектра, и концентрация электронов, оцениваемая по линии магния, были использованы для проверки возможности сохранения стехиометрии материала, попадающего в плазму, которая возникает при воздействии лазерного излучения на мишень, погруженную в воду. Концентрацию ионного компонента (для элементов, ионные линии которых не регистрируются в плазме) рассчитывали с использованием уравнения Саха с учетом значения  $FC_z$ , т.е. концентрации  $N_z$  атомов  $z$ -компонента. Установленные значения  $FC_z$  атомов и ионов всех компонентов образца приведены к мас. значениям, и их сумма равна 1,0 (100%) [3].

Аналитические линии и полученные значения концентрации приведены в таблице 2 для четырех временных интервалов между двойными импульсами. Значения концентрации цинка, полученные по указанным линиям этого элемента, совпали с относительной погрешностью, не превышающей 3%; для остальных элементов относительная погрешность не превышает 8% и зависит от временной задержки между импульсами.

**Таблица 2 – Содержание (мас.%) элементов (Zn, Cu, Al) в лазерной плазме в воде при различных задержках между лазерными импульсами**

Элемент (содержание элемента, мас. %)	$\tau$ , мкс			
	50	60	75	100
Cu (8,19%)	7,9	8,9	9,8	12,5
Zn (83,4%)	85,1	84,1	83,3	82,2
Al (7,78%)	5,9	6,9	7,6	7,2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением задержки между вторым и первым импульсами очевидна тенденция к увеличению концентрации легирующего элемента (меди, алюминия). Хотя по существу соотношения компонентов в образце и плазме не имеют резко выраженных различий, тем не менее, следует отметить, что фракционный характер легирующих добавок, поступающих в плазму, увеличивается с увеличением задержки. Такое проявление процессов фракционирования с увеличением задержки между двойными импульсами, скорее всего, объясняется переходом от взрывчатого к тепловому механизму поступления вещества.

## ЛИТЕРАТУРА

1. V.S. Burakov, N.V. Tarasenko, A.V. Butsen, V.A. Rozantsev and M. . Nedel'ko // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2005. – V. 30. – P. 107–111.
2. V.S. Burakov (et al.) // *Spectrochimica Acta B*, – 2009. – № 64/2 – P. 141–146.
3. A. Ciucci [et al.]. *Appl. Spectroscopy*, – 1999. – № 53/8. – P 960–964.

УДК 577.3

П.П. Филиппова, преп.-стажер, (БГТУ, г. Минск);  
Д.В. Григорьева, доц., канд. биол. наук,  
И.В. Горудко, д-р биол. наук, проф.,  
(БГУ, г. Минск)

## ИЗУЧЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ВАТЕРИТА С КАТАЛАЗОЙ В МОДЕЛЬНЫХ КЛЕТОЧНЫХ СИСТЕМАХ

В настоящее время отмечается интерес к использованию в качестве средств доставки неорганических носителей, в том числе карбонатов кальция, характеризующихся биоразлагаемостью, биосовместимостью, низкой токсичностью. Ватерит является одним из изоморфов карбоната кальция, характеризующийся идеальными механическими, физическими и химическими свойствами для включения лекарственных препаратов. Недостатком ватерита является небольшое включение и быстрое высвобождение положительно заряженных целевых молекул, низкая стабильность и перекристаллизация в более термодинамически устойчивый кальцит. Однако данные недостатки могут быть устранены дополнительным введением в ватерит различных биополимеров, в том числе природных полисахаридов с образованием

гибридных микрочастиц ватерита. В качестве целевой молекулы-мишени может быть использована каталаза, разлагающая пероксид водорода ( $H_2O_2$ ), что особенно важно при терапии заболеваний, ассоциированных с окислительным стрессом и воспалением. Целью работы явилась оценка антиоксидантной активности каталазы в составе нативных (CC) и функционализированных фукоиданом (CCF) или пектином (CCP) микрочастиц ватерита, а также сравнительный анализ эффектов нативных и гибридных микрочастиц ватерита с и без каталазы на функциональную активность нейтрофилов крови человека.

Карбонат кальция ( $CaCO_3$ ) занимает важное место среди используемых в медицине биосовместимых неорганических соединений. Существуют три полиморфные модификации карбоната кальция – кальцит, арагонит и ватерит, которые различаются между собой кристаллической структурой и свойствами. В частности, только поликристаллические частицы ватерита могут обладать сферической формой, развитой поверхностью и высокой пористостью. Эти свойства необходимы для эффективной адсорбции широкого спектра целевых молекул частицами, что важно с точки зрения эффективности многослойных полиэлектролитных капсул [1].

Ватерит – минерал, полиморфная форма  $CaCO_3$ . Как правило, ватерит бесцветен, имеет сферическую форму и пористую внутреннюю структуру. Диаметр частиц ватерита колеблется от 0,05 до 5 мкм. Как и арагонит, ватерит представляет собой метастабильную фазу  $CaCO_3$  в условиях окружающей среды на поверхности земли. Ватерит – наименее стабильная разновидность  $CaCO_3$  и очень быстро превращается в воде либо в кальцит, либо в арагонит, причем температуры ниже 60 °C способствуют образованию кальцита, а при более высоких температурах происходит перекристаллизация в арагонит.

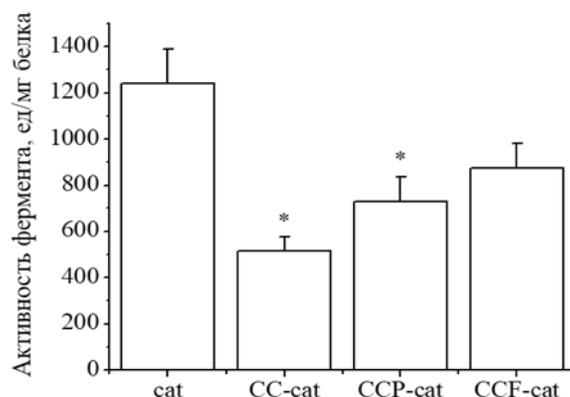
В природе ватерит встречается в минеральных источниках, возникает как второстепенный компонент более крупной структуры или в результате патологических процессов в организме человека и животных. Так, ватерит обнаружен в отолитах рыб, пресноводном жемчуге, зарубцевавшихся рубцах раковин некоторых моллюсков, желчных и мочевых камнях. В этих условиях некоторые примеси (ионы металлов или органические вещества) могут стабилизировать ватерит и предотвратить его превращение в кальцит или арагонит [2].

Наиболее распространенной точкой зрения является то, что ватерит имеет гексагональную кристаллическую симметрию и пространственную группу  $R\bar{6}3/mmc$  [3] с единичными параметрами элементарной псевдоячейки  $a' = b' = 4,13 \text{ \AA}$ ,  $c' = 8,49 \text{ \AA}$ .

В работе нейтрофилы выделяли из венозной крови, стабилизи-

рованной цитратом натрия, в градиенте плотности гистобака (1,077 г/мл). Активность каталазы оценивали по скорости убыли  $H_2O_2$ , концентрацию которого определяли по реакции с молибдатом аммония спектрофотометрическим методом, регистрируя изменение оптической плотности на длине волны 405 нм. Внеклеточную генерацию  $H_2O_2$  нейтрофилами оценивали флуоресцентным методом с использованием системы «скополетин – пероксидаза хрена» (длина волны возбуждения флуоресценции – 350 нм, регистрации – 460 нм). Внутриклеточную генерацию активных форм кислорода (АФК) и галогенов (АФГ) нейтрофилами оценивали методом проточной цитометрии с использованием флуоресцентных зондов  $H_2DCFDA$  и APF, соответственно (длина волны возбуждения флуоресценции 488 нм, регистрация – фильтр  $530 \pm 30$  нм).

Вначале нами было исследовано – сохраняется ли ферментативная активность каталазы в составе микрочастиц ватерита. Было показано, что способность каталазы катализировать реакцию разложения  $H_2O_2$  до воды в составе СС, а также в составе ССР и ССФ снижается в ~2,4, 1,7 и 1,4 раза по сравнению с активностью свободного фермента (рис. 1).

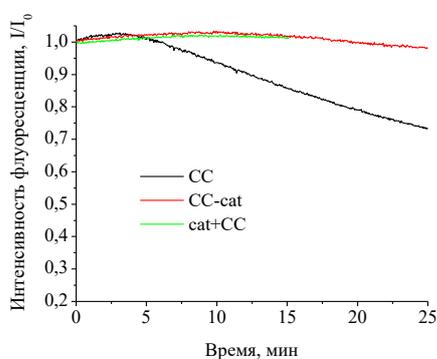


**Рисунок 1 – Активность свободной каталазы, а также фермента в составе СС, ССР и ССФ**

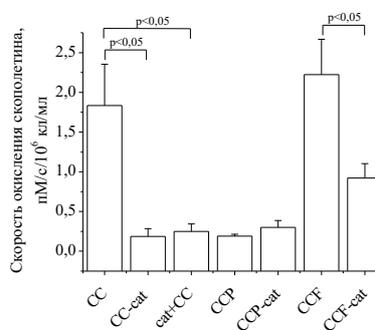
Далее было исследовано влияние нативных и гибридных микрочастиц ватерита с и без каталазы на внеклеточную продукцию АФК нейтрофилами. Было показано, что сами по себе СС вызывают сборку и активацию НАДФН-оксидазы с последующей продукцией  $H_2O_2$  (рис. 2а). Свободная каталаза, а также каталаза в составе СС ингибировала данный эффект самих СС (рис. 2а). Продукция  $H_2O_2$  нейтрофилами при действии ССР была достоверно ниже по сравнению с эффектом СС, что, вероятно, обусловлено антиоксидантной активностью

пектина. ССР с каталазой не отменяли антиоксидантного эффект самого пектина, однако синергичного эффекта пектина и каталазы в составе таких частиц также не было выявлено. ССF подобно нативным СС также вызывали респираторный взрыв нейтрофилов, однако каталаза в составе таких микрочастиц эффективно расщепляла  $H_2O_2$ , образующийся при активации клеток самими ССF (рис. 2б). На основании полученных данных можно предположить, что связывание каталазы с пектином в составе СС приводит к изменению конформации активного центра фермента и снижению ее ферментативной активности, в то время как в составе ССF каталитическая активность каталазы сохраняется.

Нами также была проведена аналогичная серия экспериментов, но в присутствии ингибитора каталазы – азида натрия. Как и ожидалось, свободная каталаза была не способна ингибировать респираторный взрыв нейтрофилов в ответ на СС в среде, содержащей азид натрия. Тем не менее, при действии СС или ССF, содержащих каталазу, скорость окисления скополетина в суспензии нейтрофилов была ниже, чем в присутствии самих СС и ССF. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что в составе микрочастиц ватерита каталаза дополнительно защищена от ингибиторов ее ферментативной активности (рис. 3).

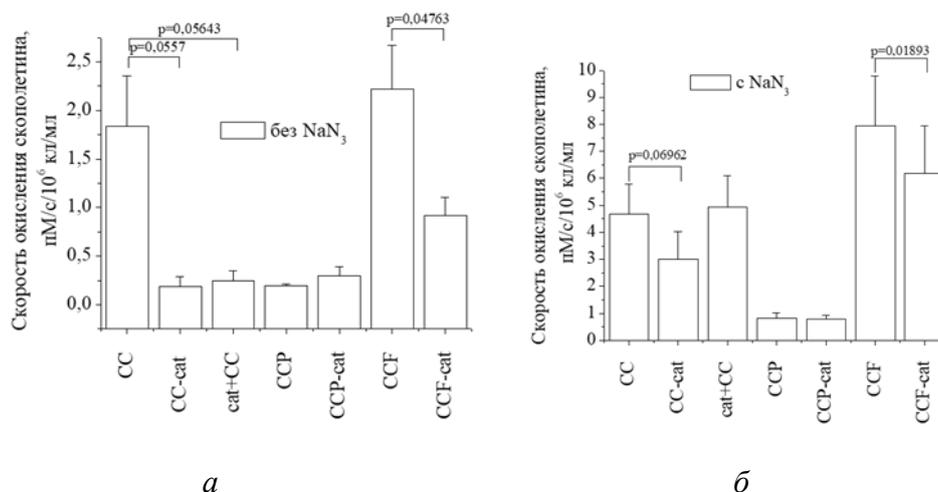


а



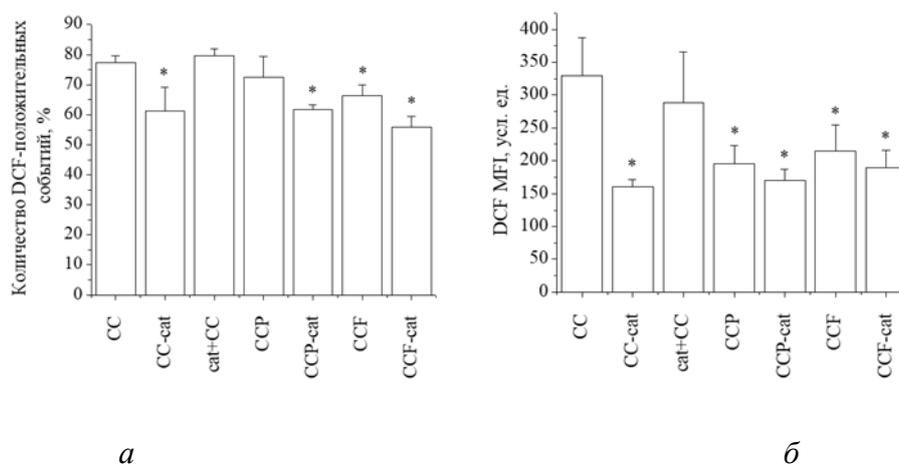
б

**Рисунок 2 – Типичные кинетические кривые окисления скополетина в суспензии нейтрофилов, активированных нативными микрочастицами ватерита (250 мкг/мл) без (СС) и с каталазой (СС-cat), а также смесью каталазы (100 мкг/мл) и СС (а); влияние нативных (СС) и гибридных (ССР или ССF) микрочастицы ватерита без и с каталазой (СС-cat, ССР-cat, ССF-cat), а также смеси каталазы и СС на скорость окисления скополетина в суспензии нейтрофилов**



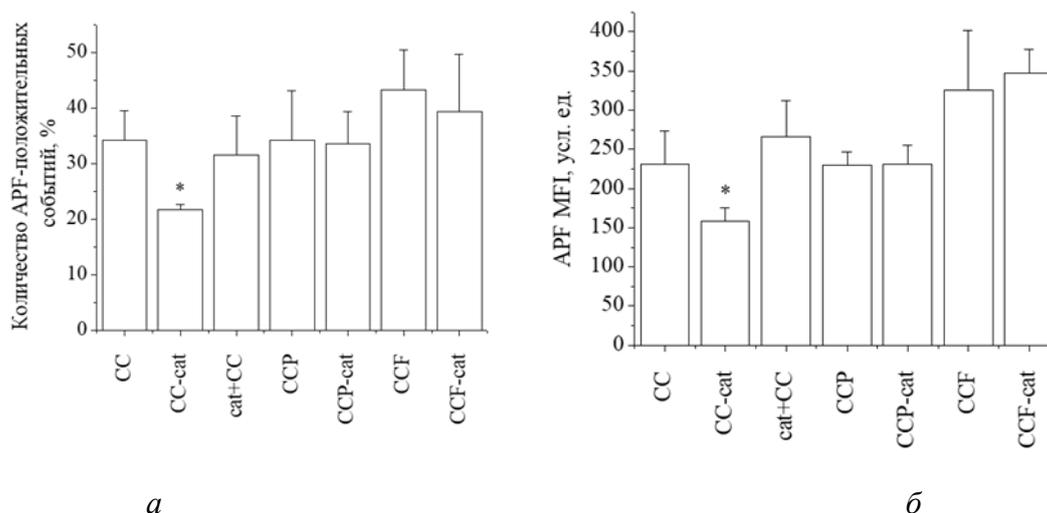
**Рисунок 3 – Влияние CC, CC-cat, cat+CC, CCP, CCP-cat, CCF и CCF-cat на скорость окисления скополетина в суспензии нейтрофилов без NaN<sub>3</sub> (а) и с NaN<sub>3</sub> (б)**

Далее нами было исследовано влияние нативных и гибридных микрочастиц ватерита с каталазой или без нее на внутриклеточную генерацию АФК в нейтрофилах. Нативные CC вызывали внутриклеточную генерацию АФК в нейтрофилах, однако после инкубации клеток с CC с каталазой число положительных по DCF событий и интенсивность флуоресценции DCF в клетках достоверно снижались (с  $77,3 \pm 2,4$  % до  $61,3 \pm 3,0$  % и с  $330,0 \pm 57,1$  усл. ед. до  $160,5 \pm 11,0$  усл. ед.). Полученные данные позволяют предположить, что CC эндоцитируются клетками, и каталаза в составе CC расщепляет генерируемый внутриклеточно H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Эффекты CCP и CCF были ниже по сравнению с эффектом нативных CC, каталаза в составе CCP или CCF несколько снижала эффекты от самих гибридных микрочастиц ватерита (рис. 4).



**Рисунок 4 – Количество DCF-положительных событий (а) и MFI DCF в популяции DCF-положительных нейтрофилов (б) при действии CC, CC-cat, cat+CC, CCP, CCP-cat, CCF и CCF-cat**

Далее нами было исследовано влияние нативных и гибридных микрочастиц ватерита с каталазой или без нее на внутриклеточную генерацию АФГ в нейтрофилах. Было выявлено, что нативные СС инициировали внутриклеточную генерацию АФГ в нейтрофилах, регистрируемую по увеличению интенсивности флуоресценции АРФ ( $364,0 \pm 29,0$  усл. ед.) в популяции АРФ-положительных событий. Однако каталаза в составе СС снижала интенсивность флуоресценции АРФ до  $184,8 \pm 27,8$  усл. ед., что свидетельствует о расщеплении образующегося внутриклеточно  $H_2O_2$ , тем самым лишая миелопероксидазу ее основного субстрата для ускорения реакций образования АФГ. Сам пектин, а также пектин в комплексе с каталазой одинаково эффективно (на  $\sim 37\%$ ) препятствовали СС-индуцированной внутриклеточной генерации АФГ в нейтрофилах. ССF подобно нативным СС инициировали внутриклеточную генерацию АФГ в нейтрофилах, каталаза в составе ССF достоверно снижала этот эффект (на  $\sim 26\%$ ) (рис. 5).



**Рисунок 5 – Количество АРФ-положительных событий (а) и MFI АРФ в популяции АРФ-положительных нейтрофилов (б) при действии СС, СС-cat, cat+СС, CCP, CCP-cat, CCF и CCF-cat**

В заключении отметим, что каталитическая активность каталазы в составе нативных и гибридных СС снижается по сравнению с активностью свободного фермента. Однако, несмотря на это, каталаза в составе СС и ССF обладает способностью расщеплять  $H_2O_2$ , генерируемый нейтрофилами в ответ на сами микрочастицы ватерита. Установлено, что инкорпорирование каталазы в такие микрочастицы ватерита является дополнительным защитным механизмом от действия на нее низкомолекулярных ингибиторов ферментативной активности. Сниженная генерация АФК и АФГ нейтрофилами в ответ на ССР с каталазой обусловлена антиоксидантной активностью самого пектина.

Таким образом, для максимального сохранения каталитической активности каталазы лучше использовать в качестве систем ее доставки СС и ССФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zámocký M., Koller F. Understanding the structure and function of catalase: clues from molecular evolution and in vitro mutagenesis // Progress in Biophysics and Molecular Biology. – 1999. – V. 72, № 1. – P. 19–66.

2. Trushina D.B., Bukreeva T.V., Kovalchuk M.V., Antipina M.N. CaCO<sub>3</sub> vaterite microparticles for biomedical and personal care applications // Mater Sci. Eng. – 2014. – P. 10–15.

3. Трушина Д. Б. Структура и свойства частиц ватерита с регулируемым размером и их применение в качестве носителей для доставки лекарственных веществ: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук 01.04.07 // Д. Б. Трушина; МГУ им. М. В. Ломоносова. –2016. – С. 6–33.

УДК 543.42.062, 681.586.5

С.Б. Бушук, канд. физ.-мат. наук., зав. лаб.,  
И.Н. Пучковский, науч. сотр.,  
С.С. Шавель, науч. сотр.,  
(ГНПО «ОЭЛТ», Минск);  
П.А. Куликовская, мл. науч. сотр.,  
М.А. Ходасевич, д-р физ.-мат. наук, гл.н.с.,  
(ИФ НАН Беларуси, г. Минск)

### **ОДНОВРЕМЕННАЯ КАЛИБРОВКА МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ОДИНОЧНОЙ ИЗОТРОПНОЙ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ И ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

Волоконно-оптические датчики на основе брэгговских решёток широко применяются для мониторинга температуры и механических деформаций в инженерных и строительных конструкциях благодаря высокой чувствительности, компактности и возможности мультиплексирования в одном оптическом волокне [1]. Спектральный отклик таких датчиков определяется положением и формой отражённого брэгговского пика, которые изменяются под действием внешних тепловых и механических воздействий.

Ранее было показано [2], что одновременное измерение темпе-

ратуры и механического напряжения может быть реализовано с использованием одного датчика на основе волоконной брэгговской решётки (ВБР) при анализе полного спектра отражения с применением многопараметрического метода частичных наименьших квадратов (PLS) [3]. Такой подход позволяет отказаться от применения дополнительных температурных датчиков и повысить интегрируемость измерительной системы при мониторинге строительных конструкций. Вместе с тем спектральный отклик брэгговских решёток при одновременном воздействии температуры и механического напряжения может проявлять нелинейные особенности, обусловленные фотоупругими и термооптическими эффектами, а также изменением формы отражённого спектра. В подобных условиях линейные регрессионные модели, включая метод PLS, могут демонстрировать ограниченную точность.

В настоящей работе для повышения точности многопараметрической калибровки предлагается использовать нелинейный метод регрессии на опорные вектора (SVR) [4] и провести сравнительный анализ результатов применения линейного метода PLS и нелинейного метода SVR для калибровки температуры и механического напряжения по спектрам отражения волоконных брэгговских решёток.

Для регистрации спектров отражения волоконных брэгговских решёток использовалось излучение свип-лазера с центральной длиной волны 1060 нм, диапазоном перестройки 100 нм и частотой 400 кГц. Отражённое излучение регистрировалось спектрометром OceanOptics USB2000 в диапазоне длин волн 670–1325 нм. Для повышения отношения сигнал–шум каждый измеренный спектр представлял собой усреднение по 25 последовательным импульсам лазерного излучения. Экспериментальные данные были получены в диапазоне температур от 299 до 398 К при различных значениях механического напряжения в диапазоне 0–5 Гпа (масса подвешенного к волокну груза 0–75 г). Было зарегистрировано 100 спектров отражения ВБР с шагом по температуре 1 К, масса груза задавалась случайным образом с шагом 1 г.

При построении многопараметрических калибровочных моделей методом PLS исходные спектры отражения ВБР проецируются в маломерное пространство латентных переменных, формируемых таким образом, чтобы максимизировать ковариацию между спектральными данными и калибруемыми параметрами – температурой и механическим напряжением. В качестве критерия качества калибровочных моделей использовалось значение среднеквадратичного отклонения оценки зависимой величины RMSEP. Экспериментальные данные были разделены на обучающую и проверочную выборки, содержащие 60 и 40 спектров соответственно. Формирование выборок осуществля-

лось по двум зависимым параметрам: температуре и механическому напряжению. В каждом случае в обучающую выборку включались по два измерения, соответствующие минимальным и максимальным значениям выбранного калибруемого параметра, что обеспечивало нахождение проверочной выборки внутри диапазона обучения. Остальные измерения распределялись между обучающей и проверочной выборками случайным образом. Для повышения статистической надёжности оценки качества моделей для каждого способа формирования выборок было выполнено по пять независимых реализаций разбиения данных. Итоговые значения метрик качества калибровки рассчитывались как средние по всем реализациям.

Для повышения точности многопараметрических калибровочных моделей и снижения избыточности исходных спектральных данных применялся метод выбора спектральных переменных на основе поиска комбинации движущихся окон – scmwiPLS (searching combination moving window interval PLS) [5]. Данный метод позволяет выявлять информативные спектральные интервалы, в наибольшей степени связанные с изменением калибруемых параметров.

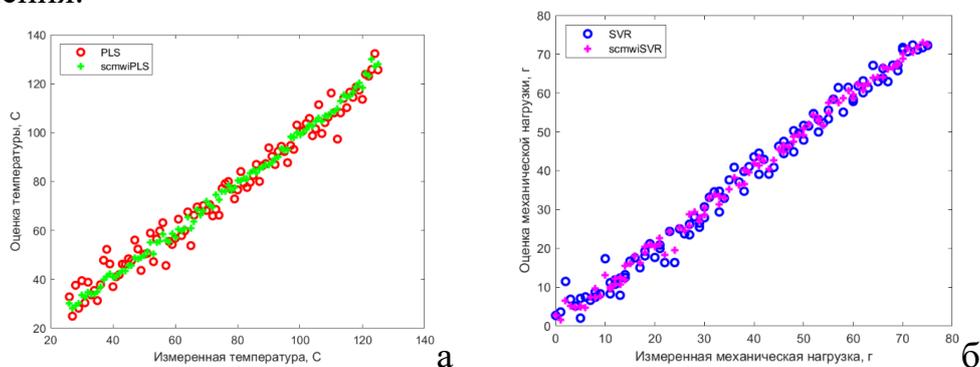
Для учёта возможных нелинейных зависимостей между спектрами отражения ВБР и калибруемыми параметрами в работе использовался метод SVR. Отличие метода SVR от PLS, оперирующего в пространствах переменных малой размерности, состоит в так называемом «трюке с ядром» – использовании функции ядра, которая, рассматривая векторы в исходном пространстве переменных, определяет их модифицированное скалярное произведение в пространстве большей размерности и позволяет рассматривать нелинейные регрессионные модели. В работе SVR применялся к спектральным переменным, предварительно отобранном методом scmwiPLS, что обеспечивало сопоставимость линейных и нелинейных моделей.

**Таблица – Среднеквадратичное отклонение RMSEP калибровки механического напряжения и температуры разными многопараметрическими моделями**

RMSEP	Методы	Формирование выборки по температуре	Формирование выборки по механическому напряжению
Температура, °C	PLS	4,94	4,94
	scmwiPLS	2,91	1,95
	SVR	5,26	5,07
	scmwiPLS+SVR	2,87	2,72
Механическое напряжение, г	PLS	2,31	2,22
	scmwiPLS	2,04	2,03
	SVR	2,78	2,64
	scmwiPLS+SVR	1,69	1,55

Как видно из представленных данных, использование выбора спектральных переменных методом *scmwiPLS* приводит к снижению значения *RMSEP* по сравнению с широкополосными моделями. Нелинейный метод *SVR* без предварительного отбора переменных не демонстрирует устойчивого преимущества по сравнению с *PLS*, тогда как комбинация *scmwiPLS+SVR* обеспечивает наименьшие значения *RMSEP* для обоих калибруемых параметров. На рисунке 1 представлены зависимости оценок температуры и механического напряжения от измеренных величин для лучших калибровочных моделей, соответствующих минимальным значениям *RMSEP*.

Итак, в работе проведено сравнение линейного метода частичных наименьших квадратов и нелинейного метода регрессии на опорные вектора при многопараметрической калибровке температуры и механического напряжения по спектрам отражения одиночной изотропной волоконной брэгговской решётки. Показано, что использование выбора спектральных переменных методом поиска комбинации комбинации движущихся окон повышает точность калибровки для обоих подходов. Наименьшие значения среднеквадратичного отклонения оценки температуры получены при применении линейной калибровки с выбором переменных, а механического отклонения – нелинейной, что указывает на возможность учета различного характера изменения спектрального отклика ВБР при воздействии температуры и механического напряжения при применении методов машинного обучения.



**Рисунок 1 – Зависимость оценок температуры методом *scmwiPLS* (а) и механического напряжения методом *scmwiPLS+SVR* (б)**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Albert, J. Tilted fiber Bragg grating sensors / J. Albert, S. L. Y. Shao, C. Caucheteur // *Laser Photonics Reviews*. – 2013. – V. 7, № 1. – P. 83–108.
2. Одновременная калибровка механического напряжения и температуры с помощью одной волоконной брэгговской решетки и

методов машинного обучения / С.Б. Бушук и др // Квантовая электроника. – 2025. – С. 521–525.

3. Geladi, P. Partial Least-Squares Regression: A Tutorial / P. Geladi, B. Kowalski. // *Analytica Chimica Acta*. – 1986. – V. 186. – P. 1–17.

4. Guenther N., Schonlau M. Support Vector Machines // *The Stata Journal: Promoting Communications on Statistics and Stata*. – 2016. – V. 16, – №. 4. – P. 917–937.

5. Ходасевич, М.А. Методы построения обучающего набора для калибровки с помощью флуоресцентной спектроскопии небольших выборок / М.А. Ходасевич, Н.А. Саскевич // *Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-мат. навук*. – 2018. – № 1. – С. 77–83.

УДК 543.422:633.88

В.А. Асеев, зав. лаб. (Университет ИТМО, С-Петербург, Россия);

Д.А. Королько, науч. сотр. (ИФ НАН Беларусі, г. Минск);

А.А. Савчук, пом. рук. центра (Университет ИТМО, С-Петербург, Россия);

М.А. Ходасевич, гл. науч. сотр. (ИФ НАН Беларусі, г. Минск)

## **ВЛИЯНИЕ ВИДА ПРЕДОБРАБОТКИ ЛАЗЕРНЫХ ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ НА ТОЧНОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КАЛИБРОВОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ СОСТАВА БИЛЛОННЫХ СПЛАВОВ**

При изучении металлических исторических артефактов пристальное внимание в настоящее время уделяется составу изучаемых объектов. Наиболее распространенным неразрушающим методом исследования в этой области является рентгено-флуоресцентный анализ, который при исследовании, например, биллонных монет (серебряных монет пятисотой и ниже пробы с, как правило, медной лигатурой) позволил уточнить время выпуска этих монет и построить их типологические цепочки, но исследует только приповерхностный слой образцов. Лазерная эмиссионная спектроскопия (LIBS) [1] позволяет проводить послойный анализ материала с высоким пространственным разрешением, а применение многопараметрической обработки данных позволяет существенно повысить точность калибровочных моделей.

Калибровочные модели содержания меди и серебра в исследуемых 13 образцах эталонных биллонных сплавов были построены по 200 лазерным эмиссионным спектрам, зарегистрированным в диапазоне длин волн 336,6–892,7 нм с шагом около 0,3 нм (2048 спектральных переменных) в 10 точках на поверхности каждого образца.

В качестве методов предобработки лазерных эмиссионных спек-

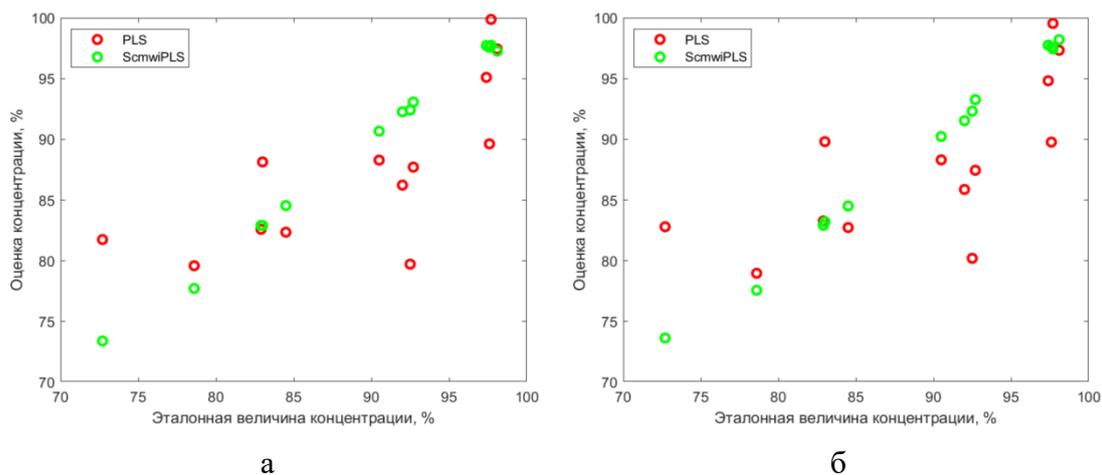
тров применялись вычисление первой (FD) и второй (SD) производных, нормировка на распределение стандартной нормальной случайной величины (SNV), нормировки на среднеквадратичное отклонение (STD), медианное абсолютное отклонения (MAD), применение р-нормы (PNorm) и коррекция базовой линии (BLC).

Перед построением калибровочных моделей входные данные (спектры и величины концентрации меди, соответственно) были случайным образом разделены на обучающую и проверочную выборки в отношении 60 % на 40 % от количества образцов [2]. Многопараметрические модели базировались на применении линейного метода частичных наименьших квадратов (PLS) [3] и нелинейного метода регрессии на опорные вектора (support vector regression – SVR) [4]. Показателями качества многопараметрических моделей являются среднее абсолютное отклонение MAE, среднеквадратичное отклонение RMSE и остаточное отклонение RPD, представляющее собой отношение стандартного отклонения концентрации меди в рассматриваемой выборке к RMSE. Также для уменьшения мультиколлинеарности и избыточности данных был применен метод выбора спектральных переменных с помощью оригинальной модификации [5] метода поиска комбинации движущихся окон [6]. В таблице приведены показатели качества созданных калибровочных моделей scmwiPLS и scmwiSVR.

**Таблица – Среднее абсолютное, среднеквадратичное и остаточное отклонение линейной и нелинейной калибровок концентрации меди в эталонных сплавах по эмиссионным лазерным спектрам в диапазоне длин волн 336,6-892,7 нм с шагом около 0,3 нм без и с выбором спектральных переменных методом поиска комбинации движущихся окон оптимальной ширины**

	scmwiPLS			scmwiSVR		
	MAE, %	RMSE, %	RPD	MAE, %	RMSE, %	RPD
–	2,42	2,70	3,0	1,20	1,43	5,7
SG	2,43	2,70	3,0	1,22	1,45	5,6
FD	0,64	0,77	10,6	0,66	0,78	10,4
SG+FD	0,30	0,42	19,4	0,82	1,13	7,3
SD	0,77	0,93	8,8	1,10	1,74	4,7
SG+SD	0,61	0,86	9,5	0,90	1,22	6,7
SNV	1,24	2,07	4,0	1,12	1,72	4,8
SG+SNV	1,38	2,22	3,7	1,00	1,46	5,6
STD	2,15	2,58	3,2	0,80	1,03	7,9
SG+STD	2,18	2,60	3,2	1,02	1,33	6,2
MAD	2,24	2,63	3,1	0,64	0,85	9,6
SG+MAD	2,26	2,64	3,1	0,99	1,22	6,7
PNorm	2,57	2,92	2,8	0,96	1,20	6,9
SG+PNorm	2,63	2,96	2,8	0,93	1,14	7,2
BLC	0,40	0,64	12,8	0,87	0,99	8,3
SG+BLC	0,34	0,47	17,5	0,65	0,81	10,1

Для линейного метода *scmwiPLS* все виды предобработки спектров кроме *PNorm* улучшают качество калибровки. Максимальная достигнутая точность определения состава эталонов соответствует вычислению первой производной и сглаживанию фильтром Савицкого-Голея ( $RPD = 19,4$ ), немного хуже характеристики при применении коррекции базовой линии также со сглаживанием ( $RPD = 17,5$ ). На рисунке 1 представлены калибровочные зависимости для этих двух видов предобработки.

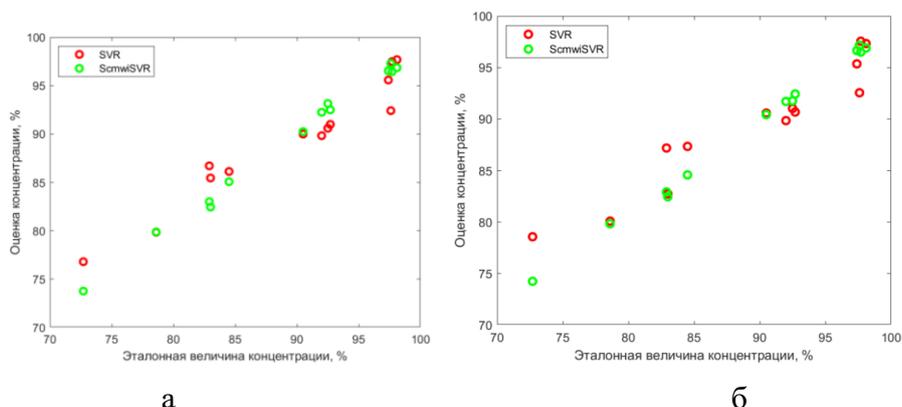


**Рисунок 1 – Калибровочные зависимости концентрации меди в эталонных сплавах, построенные методом *scmwiPLS* по сглаженным лазерным эмиссионным спектрам с применением первой производной (а) и коррекции базовой линии (б)**

Точность калибровки нелинейным методом *scmwiSVR* превышает точность линейной калибровки *scmwiPLS* для следующих видов предобработки: *SG*, *SNV*, *SG+SNV*, *STD*, *SG+STD*, *MAD*, *SG+MAD*, *PNorm*, *SG+PNorm*. Максимальные достигнутые точности нелинейных моделей, калибровочные зависимости которых представлены на рисунке 2, соответствуют применению метода *scmwiSVR* к спектрам с использованием дифференцирования ( $RPD = 10,4$ ) и коррекции базовой линии со сглаживанием ( $RPD = 10,1$ ) и уступают характеристикам лучших линейных моделей. Это может быть обусловлено тем, что линейный метод *PLS* оперирует в пространстве пониженной размерности, в котором влияние шума значительно уменьшено по сравнению с полным набором спектральных данных.

Таким образом, применение фильтра Савицкого-Голея и дифференцирования как методов предобработки лазерных эмиссионных спектров медно-серебряных эталонов в диапазоне длин волн 336,6-892,7 нм повысило точность калибровки их состава до величины среднего абсолютного отклонения 0,3 % в методе частичных наименьших квадратов с выбором спектральных переменных поиском

комбинации движущихся окон оптимальной ширины. Достигнутая точность определения концентрации меди является достаточной для нахождения стратиграфических зависимостей состава артефактов с высоким пространственным разрешением при минимальном повреждении объекта исследования и позволит получить объективную информацию о металлических артефактах.



**Рисунок 2 – Калибровочные зависимости концентрации меди в эталонных сплавах, построенные методом scmwiSVR по сглаженным лазерным эмиссионным спектрам с вычислением первой производной (а) и с применением коррекции базовой линии (б)**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Quackatz L. In situ investigation of chemical composition during TIG welding in duplex stainless steels using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) / L. Quackatz, A. Griesche, T. Kannengiesser // *Forces in Mechanics*. – 2022. – V. 6. – P. 100063.
2. Genç B. Optimal training and test sets design for machine learning / B. Genç, H. Tunç // *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. – 2019. – V. 27. – ArtID. 60.
3. Garson G.D. *Partial Least Squares (PLS-SEM)* // Statistical Publishing Associates, 2016. – 262 p.
4. Guenther N. *Support Vector Machines* / N. Guenther, M. Schonlau // *The Stata Journal: Promoting Communications on Statistics and Stata*. – 2016. – V. 16, №. 4. – P. 917–937.
5. Ходасевич М.А. Методы построения обучающего набора для калибровки с помощью флуоресцентной спектроскопии небольших выборок / М.А. Ходасевич, Н.А. Саскевич // *Весці НАН Беларусі, сер. фіз.-мат. навук*. – 2018. – № 1. – С. 77–83.
6. Du Y.P. Spectral regions selection to improve prediction ability of PLS models by changeable size moving window partial least squares and searching combination moving window partial least squares / Y.P. Du, Y.Z. Liang, J.H. Jiang, R.J. Berry, Y. Ozaki // *Analytica Chimica Acta*. – 2004. – Vol. 501. – P. 183–191.

П.С. Колодочка,  
А.В. Ляхнович,  
М. А. Ходасевич, д-р физ.-мат. наук  
(ИФ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь);  
Си Хунджу, PhD,  
Шу Джей,  
Сюй Вэй,  
(Аньхойский Вост.-Кит. НИИ «Фотоэлектроника», г. Уху, Китай)

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КЛАССИФИКАЦИИ  
ГЕОГРАФИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ  
ЛЕКАРСТВЕННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ  
ПРИ ПОМОЩИ ВЫБОРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ  
В ТГЦ СПЕКТРАХ ПРОПУСКАНИЯ МЕТОДОМ  
ПОИСКА КОМБИНАЦИИ ОКОН ОПТИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ**

Несмотря на богатую историю использования лекарственного растительного сырья (ЛРС) в традиционных медицинских системах различных культур, научный интерес к ним зачастую оказывается недостаточно высоким. Основной причиной этого является ряд факторов, которые ограничивают интенсивность и масштаб исследований в данной области. Во-первых, лекарственные растения часто рассматриваются как устаревшие или недостаточно эффективные по сравнению с современными синтетическими препаратами, что снижает их популярность среди фармацевтических компаний и исследовательских институтов, ориентированных на коммерциализацию результатов. Во-вторых, сложности, связанные со стандартизацией и контролем качества растительного сырья, а также вариативность его химического состава в зависимости от региона происхождения, способа сбора и обработки, создают дополнительные барьеры для проведения верифицируемых исследований [1]. Для унификации средств традиционной медицины необходимо определять состав и количественное содержание компонентов растительных продуктов, чтобы обеспечить эффективность, надежность и повторяемость действия лекарств и снизить их возможные побочные эффекты.

На предыдущем этапе работы нами разработаны многопараметрические классификационные модели для определения географического происхождения клубнеобразных корней *Gastrodia* [2], используемых в традиционной китайской медицине для лечения головных болей, головокружения, потери чувствительности конечностей, судорогах, невралгии, эпилепсии, невралгии и других болезней. Классифи-

кация осуществляется на основе анализа многопараметрических данных, полученных с помощью ТГц импульсной спектроскопии поглощения. Процессы подготовки образцов исследуемого лекарственного сырья, измерения временных форм прошедших через них ТГц импульсов, вычисления спектров пропускания и применения методов машинного обучения для классификации географического происхождения описаны в [2]. В данной работе описано повышение точности модели  $k$  ближайших соседей ( $k$ NN –  $k$  nearest neighbors) [2], которая классифицировала 50 образцов сырья из пяти географических локаций (Чанбайшань, Цзиньчжай, Шэньнунцзя, Сицзан и Юньнань) с точностью, прецизионностью и чувствительностью не хуже 0.98, с помощью применения выбора спектральных переменных методом поиска комбинации движущихся окон оптимальной ширины (scmwi – search combination moving window interval) [3].

На первом этапе задается ширина спектрального окна, содержащего на одну спектральную переменную больше, чем размерность пространства главных компонент [4], в котором производится кластерный анализ. Вычисленные спектры пропускания исследуемых образцов обрезаются с высокочастотной стороны до количества переменных, кратного ширине окна.

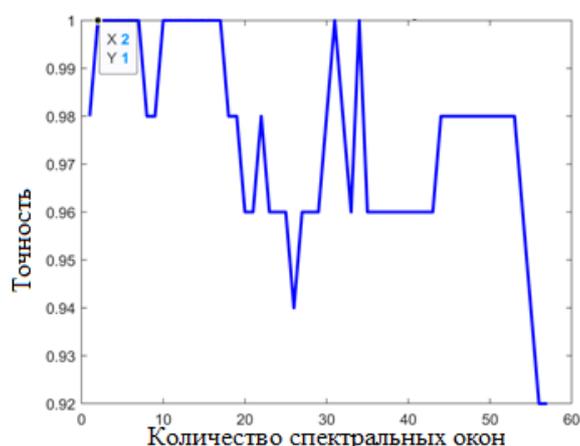
Следующий этап – определение оптимального положения первого спектрального окна по максимуму точности классификационной модели. Модель строится на каждом шаге сдвига окна на одну спектральную переменную. Из пространства спектральных переменных в составе окна выбирается пространство главных компонент размерности, определенной на этапе построения широкополосной модели. Эти главные компоненты служат входными данными для модели  $k$ NN [5], где  $k$  определяется по максимальной точности классификации модели без выбора спектральных переменных. При построении модели определяется матрица ошибок, отношение суммы диагональных элементов которой к полному количеству образцов определяет точность классификации. Максимальная точность в зависимости от положения первого окна определяет его фиксированное положение на все следующие этапы выполнения алгоритма выбора спектральных переменных.

Второе окно последовательно сдвигается на одну спектральную переменную в пределах оставшихся объединенных переменных. Построение классификационных моделей происходит по множеству спектральных переменных, состоящих из первого и второго окон. Целью выбора положения второго окна является как и на первом этапе достижение максимальной точности. Затем этот этап повторяется до использования в моделировании всех спектральных переменных.

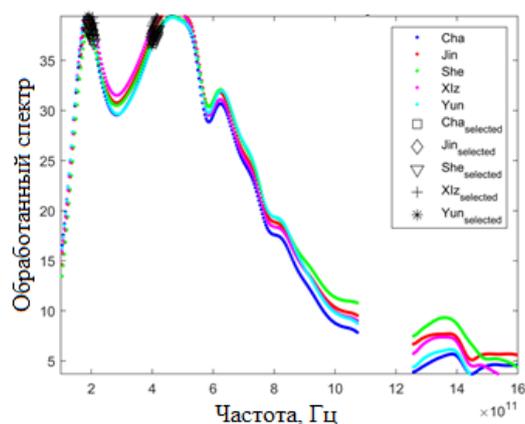
Зависимость точности классификации от количества выбранных спектральных окон приведена на рисунке 1 для следующих параметров модели: из рассмотрения исключена полоса частот 0,6–1,6 ТГц; применена нормировка спектров на стандартное отклонение и сглаживание фильтром Савицкого-Голея полиномом третьей степени по 17 отсчетам; рассмотрено пятимерное пространство главных компонент с метрикой Махаланобиса; учитываются 2 ближайших соседа.

Видно, что при учете 2 окон шириной 6 спектральных переменных (всего 12 переменных, рисунок 2) классификация становится достоверной. Для описанной выше модели точность, прецизионность (усредненная доля объектов, правильно классифицированных среди фактически принадлежащих классу), чувствительность (усредненная доля объектов, фактически принадлежащих классу среди классифицированных моделью в него) и коэффициент корреляции Мэтьюса (обобщение коэффициента корреляции Пирсона на случай рассмотрения более двух классов) равны 1. Стоит отметить, что выбранные спектральные переменные находятся вблизи двух пиков предобработанных спектров.

Реализован метод поиска комбинации движущихся окон в спектрах пропускания ТГц частотного диапазона для повышения точности решения задачи контроля качества лекарственного растительного сырья методом k ближайших соседей. Достигнуты единичные точность, прецизионность и чувствительность классификации пяти географических локаций корней *Gastrodia*.



**Рисунок 1 – Точность классификации образцов лекарственного растительного сырья *Gastrodia* из пяти географических локаций методом kNN в пятимерном пространстве главных компонент в зависимости от количества учитываемых в методе scmwі спектральных окон шириной 6 переменных**



**Рисунок 2 – Нормированные на среднеквадратичное отклонение спектры пропускания лекарственного растительного сырья *Gastrodia* при изъятии из рассмотрения частотного диапазона 0,6–1,6 ТГц и выбранные 12 спектральных переменных для построения классификационной модели к ближайших соседей ( $k=2$ ) в пятимерном пространстве главных компонент с метрикой Махаланобиса**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Liang, Y-Z. Quality control of herbal medicines / Y-Z. Liang, P. Xie, K. Chan. // *Journal of Chromatography B*. – 2004. – V. 812(1–2). – P. 53–70.
2. Многопараметрическая классификация географического происхождения лекарственного растительного сырья по ТГц спектрам пропускания / [П. Колодочка и др.] // *Информационные технологии. Физика и математика : материалы 89-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 3-18 февраля 2025 г. / Белорусский государственный технологический университет. – Минск: БГТУ, 2025. – 393 с.*
3. Ходасевич М.А., Асеев В.А. Выбор спектральных переменных и повышение точности калибровки температуры методом проекции на латентные структуры по спектрам флуоресценции  $Yb^{3+}:CaF_2$  // *Оптика и спектроскопия*. – 2018 – Т. 124, № 5. – С. 713–717.
4. Esbensen, K.H. *Principal Component Analysis: Concept, Geometrical Interpretation, Mathematical Background, Algorithms, History, Practice* / K.H. Esbensen, P. Geladi // *Comprehensive Chemometrics* / ed.: S. Brown, R. Tauler, B. Walczak. – 2009. – P. 211–226.
5. Ходасевич, М.А. Многопараметрический подход в методах оптической диагностики: основы и применения / М. А. Ходасевич; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т физики им. Б.И. Степанова. – Минск: Беларуская навука, 2024. – 114 с.

УДК: 535.375.51; 535.375.54

Г.Д. Артыкова, мл. науч. сотр.;  
А.И. Водчиц, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.;  
И.А. Ходасевич, канд. физ.-мат. наук, зам. зав. центром  
(ИФ НАН Беларуси, г. Минск);  
П.Н. Капанов, студ., (БГУ, г. Минск)

## **СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ KGW: ВЫБОР СРЕДЫ ДЛЯ "СЛУЧАЙНЫХ" ЛАЗЕРОВ**

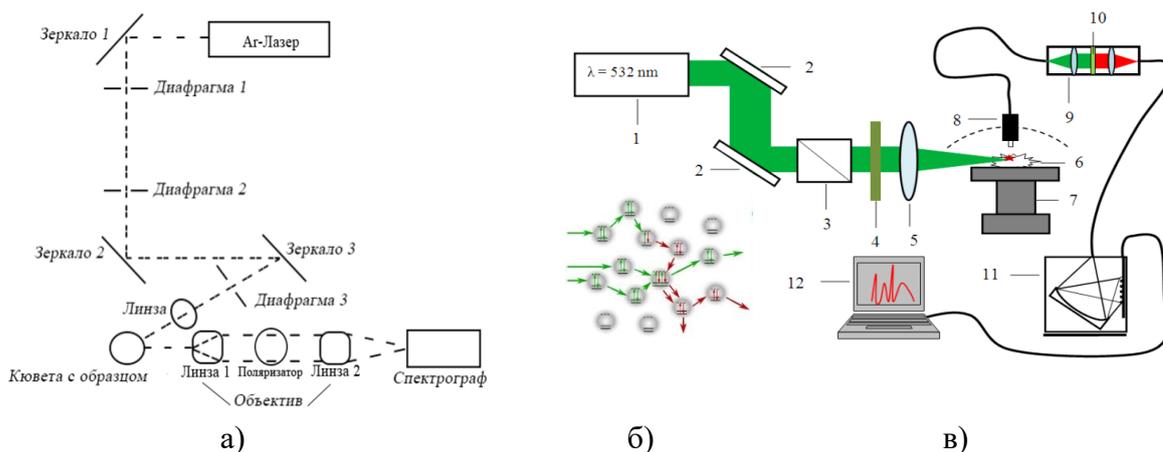
В последнее десятилетие активно развивается направление по разработке и исследованию лазеров на неупорядоченных средах, известных как «random» лазеры [1]. «Random» лазеры – это особый класс источников слабо когерентного излучения, в которых усиление осуществляется в неупорядоченной активной среде вместо традиционного оптического резонатора (Рис. 1б). Более простой способ получения микрокристаллов и увеличение длины взаимодействия для преодоления порога генерации в результате многократного отражения от граней микрокристаллов делает привлекательным использование порошков в качестве активной среды в «random» лазерах на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (РВКР-лазер) [2]. Так как излучение ВКР развивается из затравки на наиболее интенсивных колебаниях спонтанного КР (СКР), то при выборе комбинационно-активного кристалла для РВКР-лазера необходимо учитывать влияние размера частиц на интенсивность полос в его спектре СКР [3, 4], а также оптическое качество микрокристаллов. Особенно эти характеристики важны для порошков анизотропных двуосных микрокристаллов, например, кристалла калий-гадолиниевого вольфрамата ( $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ , KGW) [5], широко используемого для ВКР-преобразования [6]. Сравнительно недавно появилось направление использования ВКР в микроскопии, позволяющее выявлять конформационные различия молекулярных кристаллов вещества в его микропорошке [7].

Целью работы являлось применение методов СКР и ВКР для изучения оптических характеристик микрокристаллов KGW и обоснования выбора их размеров в порошке для создания РВКР-лазера.

Порошки микрокристаллов KGW были приготовлены путем дробления объемного кристалла (Завод «Оптик», РБ) в ударно-центробежной и струйно-вихревой мельницах, а затем разделены на фракции. Микрокристаллы KGW с размерами 500, 400, 310, 300, 250, 200, 160, 71 и 30 мкм наносились на поверхности граней кюветы слоем, толщиной 1 – 1,5 мм, и исследовались методом СКР. Для возбуждения СКР использовалось сфокусированное цилиндрической линзой

( $f = 200$  мм) излучение аргонового лазера мощностью 10,5 мВт с длиной волны  $\lambda = 514,5$  нм и вертикальной поляризацией. Спектры СКР регистрировались в  $45^\circ$ - геометрии с разрешением  $\leq 2$  см $^{-1}$  с помощью спектрометра MS3504i (Солар ТИИ, РБ) (2400 шт/мм, щель: 50 мкм) с ПЗС-камерой Spec 10:256E/LN (Roper Scientific, США) (Рис. 1а). Каждый спектр СКР был получен с экспозицией 2 с при усреднении по 20 спектрам. Кроме того, для каждого образца спектры СКР были зарегистрированы в шести различных точках и затем усреднены.

Для исследования методом ВКР использовались микрокристаллы размером 10 мкм. ВКР возбуждалось горизонтально поляризованным импульсным излучением (60 пс, 15 Гц) с энергией до 20 мДж и длиной волны 532 нм. Лазерный пучок фокусировался на горку порошка, расположенную на столике, с использованием линз с фокусным расстоянием от 150 до 250 мм. Для регистрации спектров ВКР применялся спектрометр S100 с оптическим волокном, устанавливаемым под углом от  $45^\circ$ - $90^\circ$  градусов относительно направления распространения накачивающего пучка (Рис. 2б).



Цифровые обозначения на рисунке (в): 1 – лазер; 2 – поворотные зеркала; 3 – призма Глана; 4 – светофильтр СЗС21; 5 – кварцевая линза; 6 – исследуемый образец; 7 – поворотный столик; 8 – фиксатор световода; 9 – рефокусатор; 10 – notch-фильтр; 11 – спектрометр; 12 – компьютер

**Рисунок 1 – Схемы экспериментальных установок по изучению спонтанного (а) и вынужденного (в) комбинационного рассеяния, а также усиления возбуждаемого излучения (б) в микрокристаллических порошках**

о всех зарегистрированных спектрах СКР проявляются 10 основных колебаний (Рис. 2а). Их сравнение с поляризованными спектрами КГВ с моноклинной пространственной группой кристаллической решетки I2/a (C2h6) [5] показало соответствие с колебаниями связи W–O при растяжении в ее плоскости (809, 747, 686, 436, 401 см $^{-1}$ ) и с трансляционно-изгибным колебанием (368 см $^{-1}$ ), с растяжением связи WOW (902 см $^{-1}$ ), а для связи WOOW – с растяжением в плоскости

(769 и 528 см-1) и с изгибом за ее пределы (345 см-1). Основные вклады в спектры СКР дает рассеяние, характерное для ориентаций возбуждения-наблюдения a(bb)a и b(aa)b, что согласуется с условиями эксперимента по изучению поляризованных спектров СКР. Влияние поляризации рассеянного излучения сказывается на интенсивности колебания ( $\nu_4$ ) 769 см-1. Интенсивность всех измеренных полос по поляризованным спектрам СКР увеличивалась с ростом размера частиц от 30 до 500 мкм, и достаточно хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией нарастания (Рис. 2б). По мере увеличения размеров частиц интенсивность излучения возрастает, за счет его многократного отражения от внутренних граней кристаллов, что способствует более эффективному усилению стокового излучения. Наиболее интенсивные линии в спектрах, на которых возможно развитие ВКР-преобразования, относятся к колебаниям ( $\nu_2$ ) 902 см-1 и ( $\nu_4$ ) 769 см-1. ВКР-излучение в зависимости от условий возбуждения может генерироваться одновременно на обоих колебаниях или на одной частоте, но в последнем случае они будут создавать конкуренцию для развития ВКР.

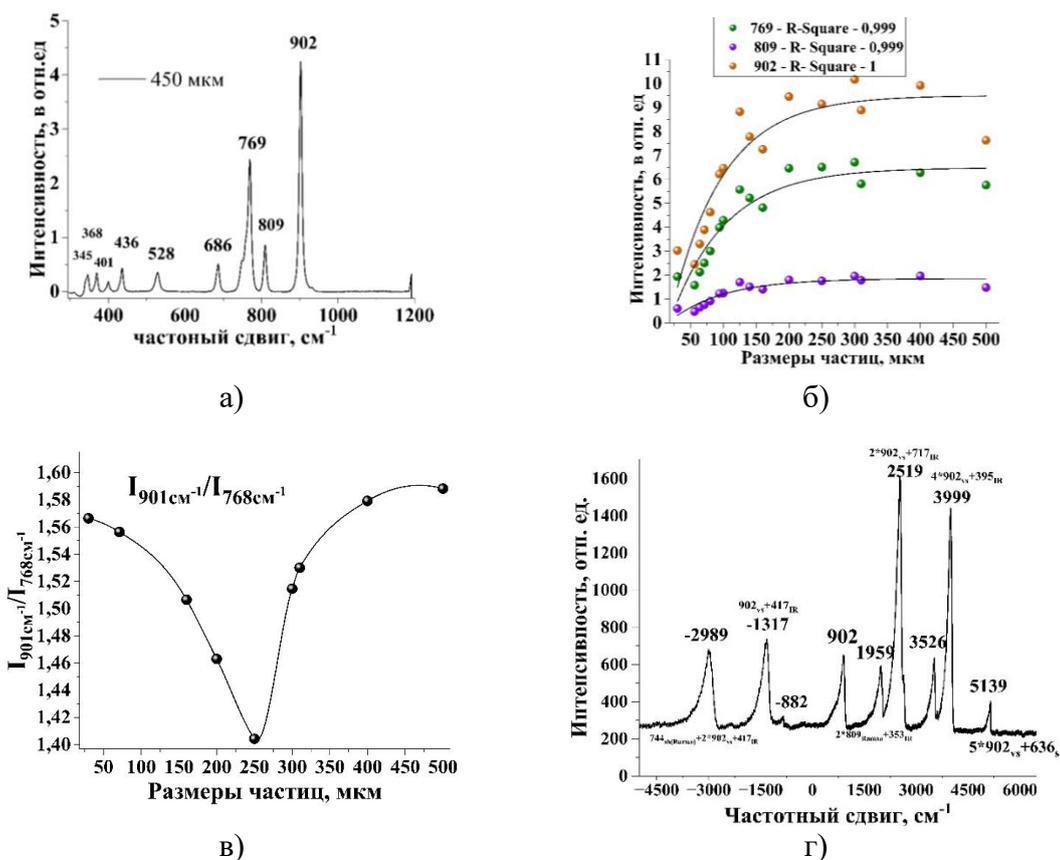


Рисунок 2 – Спектры СКР (а) и ВКР (г) порошка KGW, зависимости интенсивности полос (б) и отношения их интенсивностей для частот 902 и 769 см<sup>-1</sup> (в) от размера кристалликов

Анализ отношения интенсивностей полос этих колебаний показал, что зависимость характеризуется выраженным минимумом для микрокристаллов с размером около 250 мкм (Рис. 2в). То есть, в таком порошке конкуренция процессов ВКР будет максимальна, и его лучше использовать для генерации на двух частотах. При возбуждении одночастотного ВКР предпочтительнее использовать порошки с кристалликами 400 – 500 мкм или около 30 мкм. С одной стороны, интенсивность линий СКР больше для более крупных кристалликов, но с другой стороны, при определенных условиях возбуждения можно получить высокую интенсивность рассеяния и на мелких частицах, как показывает теория Кубелки-Мунка, предсказывающая для них диффузию фотонов в относительно локализованном пространстве [8].

В зависимости от энергии импульсов накачки, фокусного расстояния линзы и угла положения волокна в спектрах ВКР регистрировалось различное число компонент преобразованного излучения. Это обусловлено параметрическим механизмом ВКР, поскольку параметрическая связь между компонентами возрастает с уменьшением размера частиц, а угол синхронизма при таком преобразовании уменьшается с ростом энергии накачки. При возбуждении импульсами с энергией 20 мДж, при фокусировке линзой с  $f = 250$  мм и угле сбора излучения около  $60^\circ$ , было зарегистрировано 2 антистоксовые и 6 стоксовых компонент (Рис. 2г). Неоднородное уширение полос и анализ их частотных сдвигов показал, что в спектрах ВКР также проявляются колебания, характерные для инфракрасных спектров. Этот факт указывает на деформацию кристаллической решетки, которая может быть связана с механическими напряжениями в кристалликах, полученными при их дроблении до фракции в 10 мкм.

Таким образом, установлено, что интенсивность всех измеренных полос СКР увеличивалась с ростом размера частиц от 30 мкм до 500 мкм. Для ВКР-преобразования предпочтительнее использовать порошки с размером кристалликов 400 – 500 мкм или 30 – 10 мкм. В 10 мкм кристаллическом порошке KGW было получено многочастотное излучение ВКР в стоксовой и антистоксовой областях спектра. Показана возможность использования ВКР в порошках одновременно как источника излучения в новой спектральной области и как инструмента для оценки оптического качества микрокристаллов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Recent advances and applications of random lasers and random fiber lasers / A.S.L. Gomes [et al.] // Progress in Quant. Electron. – 2021. – V. 78. – P. 100343.

2. Picosecond random Raman lasing in the spectral range of 360–630 nm using powders of potassium, sodium and strontium nitrates / A.Yu. Pyatyshev et. al. // *Laser Phys. Lett.* – 2023. – V. 20. – P. 025401 (5).

3. Zeng-Ping Chen, Li-Mei Li, Jing-Wen Jin. Quantitative Analysis of Powder Mixtures by Raman Spectrometry: the influence of particle size and its correction // *Anal.Chem.* – 2012. – V. 84. – P. 4088–4094.

4. P. Kristova, L. J. Hopkinson, K. J. Rutt. The Effect of the Particle Size on the Fundamental Vibrations of the  $[\text{CO}_3^{2-}]$  Anion in Calcite // *J. Phys. Chem.* – 2015. – V. 119. – P. 4891–4897.

5. L. Macalik, J. Hanuza, A. A. Kaminskii. Polarized infrared and Raman spectra of  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  and their interpretation based on normal coordinate analysis // *J. Raman Spectrosc.* – 2002. V. 33. – P. 92–103.

6. Research progress of crystalline Raman yellow lasers / Pengbo Jiang [et al.]// *Optics and Laser Technology.* – 2024. V. 169. – P. 110072.

7. P. K. Duy, Seulah Chun, Hoeil Chung. Characterization of Raman Scattering in Solid Samples with Different Particle Sizes and Elucidation on the Trends of Particle Size-Dependent Intensity Variations in Relation to Changes in the Sizes of Laser Illumination and Detection Area // *Analytical Chem.* – 2017.

8. Bright random laser emission from a laser-conditioned powder/ V.H. Hokr [et al.] // *Nature Commun.* – 2014. – A5356.

УДК 004.827

А.Э. Гусейнов, асп.  
(АГУНП, г. Баку, Азербайджан)

## СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ АППАРАТА НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

**Аннотация.** В данной работе рассматривается возможность применения аппарата нечеткой логики для формального представления и структурирования экспертных знаний, используемых в интеллектуальных и экспертных системах. В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на построение алгоритмов логического вывода, основной акцент сделан на описании понятий предметной области и смысловых связей между ними. Для формализации экспертных оценок используются нечеткие множества и лингвистические переменные, позволяющие учитывать размытость границ понятий и субъективный характер знаний эксперта. В работе приводятся математические модели основных элементов нечеткого представления знаний, а также программный пример на Python, иллюстрирующий реализацию лингвистических понятий.

**Ключевые слова:** нечеткая логика, экспертные знания, представление знаний, лингвистические переменные.

**1. Введение.** При создании интеллектуальных систем, применяемых в технических, экономических и социально-ориентированных областях, одной из ключевых задач является формальное представление знаний, полученных от специалистов предметной области. Такие знания, как правило, формируются на основе практического опыта и интуитивных представлений эксперта и чаще всего выражаются в качественной, лингвистической форме. Понятия типа «высокая нагрузка», «умеренный риск» или «достаточный уровень надежности» не имеют строгих числовых границ и плохо поддаются описанию средствами классической логики.

Попытки использовать бинарные модели приводят к необходимости задания жестких пороговых значений, что существенно упрощает модель предметной области и, как правило, искажает исходный смысл экспертных оценок. Вероятностные методы позволяют учитывать неопределенность, однако ориентированы прежде всего на описание случайных процессов и не всегда адекватно отражают неопределенность, связанную именно с размытостью понятий и субъективностью экспертного восприятия [1]. В результате возникает необходимость в использовании формального аппарата, способного сохранить семантику экспертных знаний и обеспечить их структурированное представление.

Одним из таких аппаратов является нечёткая логика, предложенная Л. А. Заде [2]. В рамках данной работы нечеткая логика рассматривается не столько как инструмент принятия решений, сколько как средство описания и структурирования понятий предметной области и связей между ними.

**2. Формальное описание экспертных понятий.** Основным элементом нечёткой логики является нечёткое множество. Пусть  $X$  — универсальное множество значений некоторого параметра. Тогда нечёткое множество  $A \subset X$  задаётся функцией принадлежности:

$$\mu_A(x) \in [0,1] \quad (1)$$

Которая определяет степень соответствия элемента  $x$  заданному понятию [2].

В отличие от классических множеств, где принадлежность элемента определяется бинарно, использование функции принадлежности позволяет описывать плавный переход между различными состояниями. Это особенно важно при формализации экспертных понятий, границы которых, как правило, определяются не точными измерениями, а субъективными оценками специалиста.

В качестве примера можно рассмотреть понятие «высокая нагрузка системы», которое часто используется при анализе технических и информационных систем. Такое понятие может быть описано кусочно-линейной функцией принадлежности:

$$\mu_{\text{high}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x > b \end{cases} \quad (2)$$

Параметры  $a$  и  $b$  задаются экспертом и отражают его представление о границах соответствующего понятия. Подобный подход позволяет формализовать знания без их излишней дискретизации [3].

**3. Операции над нечеткими множествами и агрегирование знаний.** Для построения структуры экспертных знаний важную роль играют операции над нечеткими множествами. На практике наиболее часто используются операции пересечения, объединения и дополнения, которые в простейшем случае могут быть определены следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_{A \cap B}(x) &= \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ \mu_{A \cup B}(x) &= \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \\ \mu_{\neg A}(x) &= 1 - \mu_A(x) \end{aligned} \quad (3)$$

Использование этих операций позволяет описывать сложные экспертные конструкции, объединяющие несколько понятий. Например, состояние системы может рассматриваться как «критическое» в том случае, если одновременно выполняются условия «высокая нагрузка» и «высокий риск». Таким образом, агрегирование нечетких множеств обеспечивает формальное описание взаимосвязей между отдельными элементами структуры знаний.

**4. Лингвистические переменные в структуре знаний.** Для описания сложных понятий используется понятие лингвистической переменной, введенное Л. А. Заде [4]. Лингвистическая переменная характеризуется набором термов, каждый из которых соответствует определенному нечеткому множеству.

Например, переменная «уровень риска» может принимать значения «низкий», «средний» и «высокий». В этом случае структура знаний предметной области задается не отдельными числовыми параметрами, а системой взаимосвязанных лингвистических понятий. Такой подход обеспечивает наглядность и интерпретируемость модели [5].

**5. Нечеткие правила как элементы структуры предметной области.** Связи между лингвистическими переменными могут быть описаны с помощью нечетких правил вида:

$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ AND } y \text{ is } B \text{ THEN } z \text{ is } C \quad (4)$$

В рамках данной работы такие правила рассматриваются не как алгоритмические конструкции, а как средство описания структуры предметной области. Они фиксируют причинно-смысловые связи между понятиями, используемыми экспертом, и тем самым формируют основу базы знаний интеллектуальной системы [6].

**6. Пример программной реализации.** Для иллюстрации практической применимости описанных моделей ниже приведен пример задания нескольких лингвистических термов для параметра «нагрузка системы» на языке Python:

```
def low_load(x):
    return max(0.0, min(1.0, (50 - x) / 20))
def medium_load(x):
    if 40 <= x <= 70:
        return (x - 40) / 30
    elif 70 < x <= 90:
        return (90 - x) / 20
    else:
        return 0.0
def high_load(x):
    if x <= 60:
        return 0.0
    elif 60 < x < 80:
        return (x - 60) / 20
    else:
        return 1.0
values = [30, 50, 70, 85]
for v in values:
    print(v, low_load(v), medium_load(v), high_load(v))
```

Данный фрагмент демонстрирует, что лингвистические понятия могут быть непосредственно реализованы в программной форме и использоваться в качестве элементов структуры знаний. Аналогичным образом могут быть заданы другие переменные и связи между ними [7].

**7. Заключение.** Проведенный анализ показывает, что нечеткая логика может эффективно применяться для структурирования экспертных знаний. Использование нечетких множеств и лингвистических переменных позволяет формализовать размытые понятия и со-

хранить семантику экспертных оценок. Такой подход повышает интерпретируемость интеллектуальных систем и облегчает их дальнейшее развитие и модификацию.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dubois D., Prade H. Fuzzy sets and probability: misunderstandings, bridges and gaps // Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZY'93). – San Francisco, CA, USA: IEEE, 1993. – P. 1059-1068.
2. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8. – P. 338-353.
3. Klir G. J., Yuan B. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995. – 592 p.
4. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable // Information Sciences. – 1975. – Vol. 8, No. 3. – P. 199-249.
5. Kosko B. Fuzzy Engineering. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1997. – 400 p.
6. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2010. – 1132 p.
7. Аверкин А. Н., Батыршин И. З., Блишун А. Ф., Силов В. Б., Тарасов В. Б. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

УДК 004.056

С.А. Евдокимова, доц., канд. техн. наук,  
В.С. Моисеев, асп.,  
А.В. Скрыпников, зав. кафедрой ИБ, проф., д-р техн. наук  
(ВГУИТ, г. Воронеж)

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ**

Современные корпоративные и промышленные сети всё чаще включают в себя устройства Интернета вещей (IoT), которые играют ключевую роль в автоматизации процессов, мониторинге окружающей среды, управлении доступом и повышении общей эффективности бизнеса. Однако массовое внедрение IoT сопровождается ростом угроз информационной безопасности: использование стандартных паролей, наличие уязвимых прошивок, открытые порты, нешифрованный трафик, отсутствие централизованного контроля и мониторинга [1-3].

Поэтому разработка программного приложения, предназначенного для комплексного управления информационной безопасностью IoT-устройств в локальных сетях, является актуальной.

Программное приложение реализовано на Python и позволяет:

- автоматически обнаруживать IoT-устройства в локальной сети;
- анализировать их безопасность (наличие открытых портов, дефолтных учётных записей, тип устройства);
- проводить проверку на наличие известных уязвимостей (на основе CVE по MAC-адресу и типу устройства);
- формировать отчёты о рисках и степени соответствия требованиям информационной безопасности;
- визуализировать сетевую карту с IoT-устройствами и их статусами безопасности.

Приложение разработано с учётом требований практического применения в корпоративной среде: его можно использовать в локальной сети без выхода в интернет, оно не требует установки агентов на устройства и не нуждается в Root-доступе, обеспечивая при этом интеграцию с существующей архитектурой.

Архитектура предлагаемого продукта построена по модульному принципу и включает следующие основные компоненты:

- модуль сканирования – отвечает за сетевое обнаружение устройств в заданном диапазоне IP-адресов. Он выполняет ARP- или Nmap-сканирование с последующим анализом MAC-адресов и активных портов. Модуль работает без необходимости root-доступа и адаптирован под условия локальной корпоративной сети. При сканировании определяются MAC-адреса, открытые TCP-порты, стандартные IoT-сигнатуры;
- модуль идентификации и классификации устройств. На основании MAC-префиксов и открытых портов производится предварительное определение типа устройства: IP-камера, маршрутизатор, датчик, медиаплеер и т.д. Дальнейшая классификация позволяет задать риск-профиль для конкретного класса оборудования;
- модуль проверки дефолтных учётных записей – осуществляет автоматизированный перебор популярных логинов и паролей по Telnet и HTTP Basic Auth. В случае удачного входа устройство помечается как уязвимое и подлежит приоритизации в отчётах;
- модуль CVE-проверки – для каждого устройства по определённому типу, модели или MAC-префиксу осуществляет поиск в открытых базах уязвимостей (например, NVD, CVE Details) [4, 5].

Информация используется для расчёта риска и генерации рекомендаций;

- модуль веб-интерфейса (frontend/backend). Пользовательский интерфейс реализован с использованием Flask. Он предоставляет доступ к результатам сканирования, позволяет запускать процедуры анализа, просматривать отчёты и выгружать данные в формате CSV;

- модуль оценки риска и соответствия стандартам – на основе полученной информации рассчитывает уровень риска для каждого устройства и сопоставляет его с требованиями стандартов ГОСТ 57580, ГОСТ Р 56939 и ISO/IEC 27001. Это позволяет оценить уровень соответствия устройств требованиям информационной безопасности в организации. Применяется балльная шкала по категориям (открытые порты, CVE, пароли), маркировка: низкий / средний / высокий риск.

Пример работы программы показан на рис. 1. Для оценки используется простая балльная система, за каждый критичный фактор начисляются баллы (например, 3 за дефолтный пароль, 2 за Telnet, 2 за CVE).

В зависимости от суммы выставляется уровень риска: 0-2 балла – низкий риск, 3-5 баллов – средний риск, 6 и выше – высокий риск. На основе этого уровня приложение формирует рекомендации: изоляция, обновление, смена пароля и т.д. Оценка запускается автоматически после сканирования и проверки устройства. Результат сохраняется в таблице и используется в отчётах и визуализации, пользователь может вручную задать весовые коэффициенты для каждого фактора риска.

Для удобства взаимодействия с результатами анализа безопасности IoT-устройств в разработанном приложении реализована система визуализации и генерации отчётов. Пользовательский интерфейс предоставляет сводную таблицу с результатами сканирования всех устройств, выявленных в локальной сети. Таблица содержит ключевую информацию (рис. 1): IP-адрес, MAC-адрес, открытые порты, тип устройства, наличие дефолтных учётных данных, уровень риска и количество обнаруженных уязвимостей. Каждое устройство можно выбрать для более детального анализа. При переходе к устройству отображается информация об идентифицированных уязвимостях (CVE), включая их идентификаторы, описания и базовые оценки риска (CVSS).

Также реализована возможность оценки соответствия каждого устройства требованиям стандартов информационной безопасности (ГОСТ Р 56939, ГОСТ 57580, ISO/IEC 27001). Нарушения отображаются в виде списка, формируемого автоматически. Дополнительно

предусмотрена функция генерации отчёта в формате CSV, который включает всю информацию по каждому устройству и может быть использован для хранения, анализа или передачи в системы централизованного аудита и SIEM-платформы.



← 127.0.0.1:5000

**Сканер сетевых устройств**

**Информация о вашей системе:**

IPv4: 192.168.0.172

MAC-адрес: B4:2E:99:1A:16:04

Интерфейс: enp7s0

Платформа: Linux

**Обнаруженные устройства:**

IP	MAC	Порты	Тип	Дефолтные креды	Уровень риска
192.168.0.172	не найден	—	ПК	Нет	Низкий
192.168.0.1	78:8C:B5:ED:ED:5B	53, 80, 443	IoT-устройство	admin / admin	Высокий
192.168.0.162	B4:C9:B9:59:F2:39	—	Телефон Android	Нет	Низкий
192.168.0.195	62:74:28:A4:5A:49	—	Неизвестное устройство	Нет	Низкий
192.168.0.45	78:8B:2A:D5:BA:81	—	Телефон Iphone	Нет	Низкий
192.168.0.120	B8:87:6E:F6:32:30	443, 22	IoT-устройство	root / root	Низкий
192.168.0.219	78:8B:2A:DF:16:06	—	Телевизор	Нет	Низкий
192.168.0.103	92:9A:4A:07:B0:15	80, 443, 515	IoT-устройство	admin / admin	Средний
192.168.0.80	92:9A:4A:07:B0:15	80, 515	IoT-устройство	admin / admin	Средний
192.168.0.101	92:9A:4A:07:B0:15	—	Ноутбук	Нет	Низкий
192.168.0.188	D4:D2:D6:F7:28:C3	—	Телевизор	Нет	Низкий
192.168.0.192	74:56:3C:9D:06:55	21, 80, 443	IoT-устройство	user / 1234	Высокий
192.168.0.60	64:1C:AE:E9:8E:2A	—	Неизвестное устройство	Нет	Низкий

**Рисунок 1 – Результат работы программного приложения**

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет сканировать корпоративную сеть, выявлять IoT-устройства, проверять их на наличие открытых портов и уязвимых сервисов, анализировать наличие дефолтных учетных записей, проводить оценку уязвимостей на основе актуальных данных и формировать профиль рисков для каждого устройства.

Среди преимуществ разработанного решения можно выделить его универсальность, модульную архитектуру, кроссплатформенность, а также возможность автономной работы в изолированных сетях без постоянного подключения к внешним источникам. Проведённое тестирование на реальных и виртуальных устройствах подтвердило работоспособность и эффективность предложенного решения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Винявский, А.А. Industrial Internet of Things: риски и защита в цифровую эпоху / А.А. Винявский // Автоматизация в промышленности. – 2024. – № 9. – С. 57-60.
2. Евдокимова, С.А. Проблемы безопасности промышленного интернета вещей / С.А. Евдокимова // Актуальные проблемы автоматизации, роботизации и управления в технических, организационных, экономических системах : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции преподавателей и специалистов и Всероссийской научно-практической конференции студентов и молодых ученых. – Воронеж, 2025. – С. 62-68.
3. Cindrić, I. Mapping of Industrial IoT to IEC 62443 Standards / I. Cindrić, M. Jurčević, T. Hadžina // Sensors. – 2025. – Vol. 25(3). – S. 728. – DOI: 10.3390/s25030728.
4. NVD – Home. National Vulnerability Database. – URL: <https://nvd.nist.gov/> (дата обращения: 18.01.2026).
5. CVE: Common Vulnerabilities and Exposures. – URL: <https://cve.mitre.org/> (дата обращения: 18.01.2026).

УДК 517.925

Р. Пренов;

Р. Мамедсалиев

(Туркменский государственный университет имени Магтымгулы, г. Ашхабад);

(Туркменский инженерно-технологический университет имени Огуз Хана,

г. Ашхабад, Туркменистан)

## ОБ ОДНОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

В настоящей работе рассматривается нелокальная начально-краевая задача для системы гиперболических уравнений первого порядка.

$$\begin{cases} \frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = a(x) \frac{\partial u(t,x)}{\partial x} - \delta u(t,x) + b(t,x)v(t,x) + f_1(t,x), & 0 < t \leq T, \quad 0 < x < l, \\ \frac{\partial v(t,x)}{\partial t} = -a(x) \frac{\partial v(t,x)}{\partial x} - \delta v(t,x) + f_2(t,x), & 0 < t \leq T, \quad 0 < x < l, \\ u(t,0) = u(t,l), \quad v(t,0) = v(t,l), & 0 \leq t \leq T, \\ u(0,x) = u_0(x), \quad v(0,x) = v_0(x), & 0 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь

$$a(x) \geq a > 0, \quad f_1(t,x), f_2(t,x), \quad u_0(x), v_0(x), \quad b(t,x), \quad \delta > 0, \quad ((t,x) \in [0,T] \times [0,l])$$

непрерывные функции согласуются совокупности переменных быть гладким решением задачи (1).

Задача (1) может пользоваться по газовой динамике, акустики, распространении электромагнитных волн, гидродинамики и др.[5].

**Теорема 1.** Для решения системы (1) справедлива оценка устойчивости [1-2]

$$\begin{aligned} \max_{0 < t < T} \|u\|_{C[0,l]} + \max_{0 < t < T} \|v\|_{C[0,l]} \leq M[\|u_0\|_{C[0,l]} + \|v_0\|_{C[0,l]} + \\ + \max_{0 < t < T} \|f_1\|_{C[0,l]} + \max_{0 < t < T} \|f_2\|_{C[0,l]}] \end{aligned}$$

Здесь  $M$  - не зависит  $u_0, v_0, f_1, f_2$ .

**Доказательство.** Для доказательства теоремы опирается свойства позитивности линейного оператора. Поэтому задача (1) напишем в операторном виде. Дадим область определения оператора

$$D(A) = \left\{ (u, v): u \in C^1[0, l], v \in C^1[0, l], \right. \\ \left. \begin{aligned} u(0) = \gamma u(l), \quad \beta v(0) = v(l), \quad 0 \leq x \leq l \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$A \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} aB & -1 \\ 0 & aB \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (3)$$

Здесь  $Bu = \frac{\partial u(x,t)}{\partial x}, u(0) = \gamma u(l), 0 \leq x \leq l,$

$$Bv = \frac{\partial v(x,t)}{\partial x}, \beta v(0) = v(l), 0 \leq x \leq l,$$

Тогда задача (1) приводится в следующий вид

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = a(x)Bu - v(x,t) + f_1(x,t), & 0 < x < l, 0 < t \leq T, \\ \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = -a(x)Bv + f_2(x,t), & 0 < x < l, 0 < t \leq T, \\ u(0,t) = \gamma u(l,t), \quad \beta v(0,t) = v(l,t), & 0 \leq t \leq T, \\ u(x,0) = u_0(x), \quad v(x,0) = v_0(x), & 0 \leq x \leq l. \end{cases} \quad (4)$$

Для конкретности доказательство теорема 1. вводим следующих векторных функции

$$\left\{ \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \end{pmatrix} \right\}, \quad \begin{pmatrix} u(0) = \gamma u(l) \\ \beta v(0) = v(l) \end{pmatrix},$$

и нормы  $[0, l] \times [0, l]$  в прямоугольнике:

$$\begin{aligned} \left\| \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \end{pmatrix} \right\|_{C[0,l] \times C[0,l]} &= \max_{0 \leq x \leq l} |\varphi| + \max_{0 \leq x \leq l} |\psi|, \\ \left\| \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \end{pmatrix} \right\|_{C^\alpha[0,l] \times C^\alpha[0,l]} &= \left\| \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \end{pmatrix} \right\|_{C[0,l] \times C[0,l]} + \\ + \sup_{\substack{1 \leq s < x + s \leq l \\ x \neq s}} \frac{|\varphi(x) - \varphi(s)|}{(x-s)^\alpha} &+ \sup_{\substack{1 \leq s < x + s \leq l \\ x \neq s}} \frac{|\psi(x) - \psi(s)|}{(x-s)^\alpha} \end{aligned}$$

$C[0, l] = C[0, l] \times C[0, l]$ ,  $C^\alpha[0, l] = C^\alpha[0, l] \times C^\alpha[0, l]$ , ( $0 < \alpha < 1$ )  
 Здесь  $C^\alpha[0, l] = C^\alpha[0, l] \times C^\alpha[0, l]$ , ( $0 < \alpha < 1$ ) пространства непрерывных функций Гёльдера. Задача (1) приводится следующий операторному виду:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} + F, \quad \begin{pmatrix} u(x, 0) \\ v(x, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0(x) \\ v_0(x) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix}.$$

здесь

**Теорема 2.** Все  $\lambda > 0$  являются регулярными точками для резольвенты  $(\lambda + A)^{-1}$  оператора  $(-A)$  и справедлива оценка

$$\|(\lambda + A)^{-1}\|_{C[0, l] \rightarrow C[0, l]} \leq \frac{M_2}{\lambda + \delta}, \quad (6)$$

Здесь  $M_1$  постоянная не зависящим от  $\lambda$ .

**Доказательство.** Для доказательства теорем обозначим позитивный оператор

$$(\lambda + A) \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \end{pmatrix}$$

Здесь можем взять следующее равенство

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = (\lambda + A)^{-1} \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \end{pmatrix}$$

Поэтому воспользуемся формулой для решения системы

$$\begin{cases} a(x) \frac{du}{dx} + \delta u(x) + \lambda u(x) - v(x) = \phi(x), & 0 < x < l, \\ -a(x) \frac{dv}{dx} + \delta v(x) + \lambda v(x) = \psi(x), & 0 < x < l, \\ u(0) = \gamma u(l), & \beta v(0) = v(l). \end{cases} \quad (7)$$

Решая система задачи (7) мы можем написать функция Грина

$$\begin{pmatrix} u(x) \\ v(x) \end{pmatrix} = (A + \lambda I)^{-1} \begin{pmatrix} \varphi(x) \\ \psi(x) \end{pmatrix} = \int_0^l G(x, s, \lambda) \begin{pmatrix} \varphi(s) \\ \psi(s) \end{pmatrix} ds \quad (8)$$

Здесь  $G(x, s, \lambda) = \begin{pmatrix} G_{11}(x, s, \lambda) & G_{12}(x, s, \lambda) \\ 0 & G_{22}(x, s, \lambda) \end{pmatrix},$

$$G_{11}(x, s, \lambda) = P \times \begin{cases} \frac{1}{a(s)} e^{-(\delta+\lambda) \int_s^x \frac{dy}{a(y)}} & , 0 \leq s \leq x, \\ \frac{\gamma}{a(s)} e^{-(\delta+\lambda) (\int_0^s \frac{dy}{a(y)} + \int_s^l \frac{dy}{a(y)})} & , x \leq s \leq l, \end{cases} \quad (9)$$

$$G_{22}(x, s, \lambda) = Q \begin{cases} \frac{\beta}{a(s)} e^{-(\delta+\lambda) (\int_0^s \frac{dy}{a(y)} + \int_s^l \frac{dy}{a(y)})} & , 0 \leq s \leq x, \\ \frac{1}{a(s)} e^{-(\delta+\lambda) \int_x^s \frac{dy}{a(y)}} & , x \leq s \leq l, \end{cases} \quad (10)$$

$$G_{12}(x, s, \lambda) = \delta \times \int_0^l G_{11}(x, p, \lambda) G_{22}(p, s, \lambda) dp, \quad (11)$$

$$P = \left(1 - \beta \cdot e^{-\left(\delta + \lambda\right) \int_0^l \frac{dy}{a(y)}}\right)^{-1}, \quad Q = \left(1 - \gamma \cdot e^{-\left(\delta + \lambda\right) \int_0^l \frac{dy}{a(y)}}\right)^{-1}$$

Получим второе уравнений задача (7):

$$-a(x) \frac{dv}{dx} + \delta v(x) + \lambda v(x) = \psi(x), \quad 0 < x < l$$

$$v(x) = e^{-\left(\delta + \lambda\right) \int_0^l \frac{dy}{a(y)}} v(l) + \int_0^l \frac{1}{a(s)} e^{-\left(\delta + \lambda\right) \int_x^s \frac{dy}{a(y)}} \psi(s) ds$$

Полученные оценки используя для решения задачи (7) и неравенство треугольника получим следующий оценки:

$$|u(x)| \leq \int_0^l |G_{11}(x, s, \lambda)| ds \max_{0 \leq s \leq l} |\varphi(s)| + \int_0^l |G_{12}(x, p, \lambda)| ds \max_{0 \leq s \leq l} |\psi(s)|$$

$$|v(x)| \leq \int_0^l |G_{22}(x, s, \lambda)| ds \max_{0 \leq s \leq l} |\psi(s)|$$

Суммируя полученных оценок можно писать оценка неравенство нормы:

$$\left\| \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \right\|_{C[0, l]} \leq \frac{M}{(\delta + \lambda)} \left\| \begin{pmatrix} \varphi \\ \psi \end{pmatrix} \right\|_{C[0, l]}$$

Здесь  $M$  – константа. Полученная оценка обладает устойчивости решения в пространства  $C[0, l]$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ashyralyev A., Prenov R. The hyperbolic system of equation with nonlocal boundary conditions. //Turkic world mathematical society journal of applied and engineering mathematics journal TWMS, Volume 2. No. 2 2012, pp. 154-178
2. Ashyralyev A., Prenov R. Finite-difference method for the hyperbolic system of equations with nonlocal boundary conditions. // Advances in Difference Equations, Vol. 2014, Article No 26. pp. 2-28.
3. Пренов Р. Структура дробных пространств, устойчивость разностной схемы для гиперболических систем уравнений. //Труды научной конференции: Актуальные проблемы прикладной математики, физики и энергетики, посвященной IV годовщине нейтралитете Туркменистана.- А.: Ылхам, 1999.– с. 62-65.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука 1972.

Д.Х. Мухидинов, магистрант  
(БНТУ, г. Минск);

Д.Х. Мухиддинов  
(Каршинский государственный университет, г. Карши, Узбекистан);

В.М. Романчак, доц.  
(БНТУ, г. Минск)

## **КВАЛИМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ В ШКАЛЕ РАВНЫХ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ОНЛАЙН-ПЛАТФОРМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ УЗБЕКИСТАНА И БЕЛАРУСИ**

**Аннотация.** В статье представлена методика объективной оценки технического качества онлайн-платформ образовательного назначения на основе квалиметрической модели, построенной строго в шкале равных отношений. В качестве объектов исследования выступают государственные платформы Республики Узбекистан (MySchool) и Республики Беларусь (Edu.by). Отобраны пять объективных показателей качества – время загрузки страницы, время отклика API, объём потребляемого трафика, частота технических ошибок и время запуска видео, – все из которых измеримы исключительно в шкале равных отношений. Для определения весовых коэффициентов применён логарифмический метод парных сравнений, а для агрегирования – мультипликативная форма, корректная для данной шкалы. Экспериментальные измерения проведены в стандартизованных условиях с использованием инструментов Chrome DevTools, Postman и Python. Результаты показали, что Edu.by превосходит MySchool по интегральному индексу качества в 1,54 раза. Предложенная модель обеспечивает метрологическую корректность, воспроизводимость и международную сопоставимость, что открывает перспективы для её применения в практике сертификации цифровых образовательных ресурсов.

*Ключевые слова:* квалиметрия, шкала равных отношений, онлайн-платформы образовательного назначения, техническое качество, интегральный индекс.

**Введение** В условиях глобальной цифровизации образования всё большее значение приобретает не только наличие онлайн-платформ, но и их объективно измеримое техническое качество. В Республиках Узбекистан и Беларусь активно развиваются национальные цифровые образовательные экосистемы – MySchool и Edu.by соответственно. Однако оценка этих платформ по-прежнему основывается на субъективных отзывах пользователей или количественных по-

казателях охвата, что не позволяет проводить научно обоснованное сравнение. В связи с этим актуальной становится задача разработки метрологически корректной методики оценки качества, основанной на строгих принципах теории измерений.

**Цель и методология исследования:** Целью настоящего исследования является разработка и применение квалиметрической модели, построенной исключительно в шкале равных отношений, для объективного сравнения технического качества платформ MySchool (Узбекистан) и Edu.by (Беларусь).

В работе использованы следующие методы:

- Теория измерений (С. Стивенс) – для обоснования выбора шкалы равных отношений;
- Методы квалиметрии – для построения структуры модели;
- Инструментальные измерения – с использованием Chrome DevTools, Postman и Python-скриптов (библиотека Selenium);
- Статистический анализ – t-критерий Стьюдента и критерий Шапиро–Уилка для проверки значимости различий;
- Логарифмический метод парных сравнений – для определения весовых коэффициентов с сохранением свойств шкалы отношений.

**Результаты исследования** Экспериментальные измерения проведены в стандартизированных условиях (одинаковое оборудование, скорость интернета 50 Мбит/с, 10 повторов на каждый показатель). Полученные данные подверглись статистической обработке. Результаты показали, что по всем пяти показателям платформа Edu.by демонстрирует лучшие значения:

- Время загрузки: 1240 мс против 1850 мс у MySchool;
- Частота ошибок: 3.5 против 7.2 на 1000 операций;
- Потребление трафика: 52 МВ против 68 МВ.

Все различия статистически значимы ( $p < 0.001$ ). На основе разработанной квалиметрической модели был рассчитан интегральный индекс качества:

- MySchool:  $Q=0.162$
- Edu.by:  $Q=0.250$

Это означает, что Edu.by превосходит MySchool в 1.54 раза по техническому качеству в рамках данной модели.

**Заключение** Предложенная методика обеспечивает объективность, воспроизводимость и международную сопоставимость оценки качества онлайн-платформ. Она может быть использована Министерствами образования Узбекистана и Беларуси при сертификации LMS, а также разработчиками для оптимизации производительности. Дан-

ная работа вносит вклад в развитие метрологически обоснованной квалитметрии в педагогике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2017. Системная и программная инженерия. Системы и программное обеспечение. Модель качества. – М.: Стандартиформ, 2017.
2. Тарасенко В. В. Квалитметрия: теория и практика. – М.: Машиностроение, 2015. – 320 с.
3. Google. Core Web Vitals // developers.google.com. – 2023.
4. Государственная программа «Информационное общество на 2021–2025 годы» (РБ). – Минск, 2021

УДК 004.056.5

П.С. Мырадов, Дж. Сохбедов  
(Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары)

### **РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ЗАЩИТУ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДОЗРИТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ**

Введение: С развитием облачных технологий, Интернета вещей и распределённых систем значительно возрос объём сетевого трафика, что привело к усложнению задач мониторинга и защиты сетевой инфраструктуры. Современные кибератаки отличаются высокой степенью автоматизации, скрытности и адаптивности, что делает традиционные системы обнаружения вторжений (IDS) менее эффективными.

Методы искусственного интеллекта и машинного обучения предоставляют новые возможности для анализа больших объёмов данных и выявления нетипичных шаблонов поведения. В этой связи разработка интеллектуальной платформы для обнаружения подозрительной активности в сетевом трафике является актуальной научной и практической задачей.

Обзор существующих решений Существующие системы защиты можно условно разделить на две группы:

1. Сигнатурные системы – основываются на заранее известных шаблонах атак. Они демонстрируют высокую точность при обнаружении известных угроз, но практически неэффективны против новых и модифицированных атак.

2. Аномальные системы – анализируют отклонения от нормального поведения сети. Данные системы обладают большей гибкостью, однако часто страдают от высокого уровня ложных срабатываний.

Современные исследования направлены на интеграцию методов глубокого обучения (нейронные сети, LSTM, автоэнкодеры) для повышения точности обнаружения и снижения количества ложных тревог.

### 3. Архитектура разрабатываемой платформы

Предлагаемая платформа состоит из следующих функциональных модулей:

#### 1. Модуль сбора данных

Осуществляет перехват и агрегацию сетевого трафика с использованием протоколов NetFlow, sFlow или зеркалирования портов (SPAN).

#### 2. Модуль предварительной обработки

Включает очистку данных, нормализацию, извлечение признаков (feature extraction) и агрегацию временных окон.

#### 3. Модуль интеллектуального анализа

Реализует модели машинного обучения: алгоритмы классификации (Random Forest, SVM); нейронные сети (CNN, LSTM); методы кластеризации для выявления аномалий (DBSCAN, k-means).

#### 4. Модуль принятия решений

Формирует оповещения, классифицирует угрозы по уровню опасности и передает информацию в систему реагирования.

#### 5. Интерфейс администратора

Предоставляет визуализацию трафика, отчеты, настройку пороговых значений и обучение моделей.

#### Методы и алгоритмы

Для обучения моделей используются размеченные датасеты (например, CIC-IDS2017, UNSW-NB15). В ходе экспериментов применялись следующие методы:

Супервизорное обучение: логистическая регрессия, градиентный бустинг, нейронные сети;

Несупервизорное обучение: автоэнкодеры для выявления аномалий;

Гибридные модели: комбинация сигнатурного и интеллектуального анализа.

Для оценки эффективности применяются метрики:

Assurasy (точность),

Precision,  
Recall,  
F1-score,  
ROC-AUC.

Экспериментальные результаты

Эксперименты показали, что использование LSTM-сетей позволяет достичь точности обнаружения атак до 96%, при этом уровень ложных срабатываний снижается на 18% по сравнению с классическими методами. Автоэнкодеры эффективно выявляют ранее неизвестные типы атак, демонстрируя высокую чувствительность к аномальному поведению.

Обсуждение

Результаты подтверждают целесообразность применения ИИ для мониторинга сетевого трафика. Основными преимуществами разработанной платформы являются:

- адаптивность к новым типам атак;
- возможность обработки данных в реальном времени;
- масштабируемость для корпоративных сетей.

К ограничениям можно отнести:

- необходимость больших объемов обучающих данных;
- вычислительную сложность моделей;
- риск переобучения.

Заключение

В данной работе представлена концепция и реализация интеллектуальной платформы для обнаружения подозрительной активности в сетевом трафике. Применение методов искусственного интеллекта значительно повышает эффективность защиты по сравнению с традиционными подходами. В дальнейшем планируется внедрение механизмов самообучения, интеграция с SIEM-системами и расширение базы сценариев атак.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sommer R., Paxson V. Outside the closed world: On using machine learning for network intrusion detection. IEEE Symposium on Security and Privacy, 2010.
2. Buczak A. L., Guven E. A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016.
3. Sharafaldin I., Lashkari A., Ghorbani A. Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization. ICISSP, 2018.

## **ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОНЛАЙН-КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПОЛИГРАФИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

В представленной работе рассматриваются математические уравнения для моделирования печатного процесса. Полиграфическое производство включает в себя допечатный, печатный и послепечатный процессы изготовления полиграфической продукции. На каждом этапе изготовления требуется контроль параметров качества в соответствии со стандартами. Контроль качества является составляющей информационной системы печатного процесса, представленной в работе [1]. Недостаточный уровень контроля качества может привести к отправке всего тиража в отходы, что является следствием появления прямых и косвенных затрат. В качестве параметра контроля воспроизведения изображения в соответствии со стандартами используется критерий изменения площади растрового элемента на запечатываемой поверхности.

В результате различных исследований и развития технологий, в том числе оптических и спектрофотометрических систем, появилось понятие оптического и механического растискивания, где оптическое растискивание является результатом уменьшения плотности точки по краям из-за резкого снижения плотности внутри точки, а механическое растискивание — увеличение ее размера вследствие механического воздействия. Для контроля оптического растискивания используют такие контрольно-измерительные устройства как денситометры и спектрофотометры. Для контроля механического растискивания существует необходимость разработки математической модели.

Целью работы является разработка математической модели процесса онлайн-контроля качества полиграфической продукции на основе определения изменения размеров растровых печатных элементов в процессе печати.

Для достижения поставленной цели было разработано программное средство, позволяющее определять линейные размеры печатных элементов на печатной форме и печатной оттиске. При использовании программного средства можно получить совокупность значений линейных размеров штриховых элементов в вертикальном и горизонтальном направлении. На протяжении печати тиража размеры штриховых элементов могут изменяться в зависимости от таких техно-

логических факторов, как давление печати, подачи печатной краски и износостойкости печатных элементов. Математическое моделирование печатного процесса заключается в получении модели сравнения размеров элементов на печатном оттиске с элементами на печатной форме, что способствует учитывать влияние всех технологических факторов, а не по отдельности. Результатом математического моделирования должна быть функция, которая позволяет спрогнозировать ухудшение качества печати и выявить какие факторы смогли на это повлиять. Для этого необходимо использовать совокупность уравнений, описывающих отклонение размеров элементов на оттиске от размеров на печатной форме.

Стандартным значением принимается размер элементов на печатной форме и обозначается как  $L_f$ . Вычисляется разница между размером на оттиске  $L_T$  и на печатной форме  $L_f$  в зависимости от тиража следующим образом:

$$\Delta L_i = L_{Ti} - L_f \quad (1)$$

где  $L_{Ti}$  – значение размера элемента на  $i$ -ом тираже.

Полученные значения суммируются и определяется среднее значение:

$$\overline{\Delta L} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_i}{n} \quad (2)$$

где  $n$  — количество исследуемых оттисков.

Далее необходимо определить среднее квадратичное  $S$  отклонение, чтобы скорректировать полученные данные.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta L_i - \overline{\Delta L})^2}{n} \quad (3)$$

После этого необходимо подобрать аппроксимирующую функцию, которая наиболее точно позволит спрогнозировать отклонения, которые смогут быть в процессе печати. Для этого можно использовать следующую формулу.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - f(T_i))^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \overline{S_i})^2} \quad (4)$$

где  $f(T_i)$  – функция аппроксимации для  $i$ -го тиража,  $R^2$  – коэффициент детерминации,  $T$  – тираж.

Чем выше значение  $R^2$  и ближе к 1, тем лучше подобрана функция  $f(T)$  и данные эксперимента находятся на линии графика аппроксимирующей функции.

Следует отметить, что при использовании программного средства получаем множество точек, каждая из которых соответствует своему размеру, если необходимо выполнить случайную выборку нескольких точек, в которых размеры отличаются, то тогда необходимо учитывать это следующим образом.

$$\overline{S_j} = \frac{\sum_{j=1}^m S_j}{m} \quad (5)$$

где  $S_j$  – среднеквадратичное отклонение в  $j$ -ой точке,  $m$  – количество выбранных точек.

Формула (4) подходит для анализа изменений в одной точке. Учитывая выражение (5) и подставив его в (4), то получится соотношение учитывающее локальные изменения в нескольких местах.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (S_{ji} - f(T_i))^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (S_{ji} - \overline{S_{ji}})^2} \quad (6)$$

Таким образом, выражения (1)-(6) являются составляющими математической модели процесса онлайн анализа качества полиграфической продукции на основе получаемых данных с помощью разработанного программного средства. Эта модель позволит подобрать наиболее подходящую функцию  $f(T)$ , которая позволит спрогнозировать ухудшение качества полиграфической продукции и применить методы по устранению появления бракованной продукции.

Также можно будет учитывать износ печатной формы, который приводит к ухудшению качества печатных оттисков, и своевременно устранить появление дефектов путем замены печатной формы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барковский Е. В., Урбанович П. П. Моделирование информационной системы полиграфического производства в условиях износа поверхности материалов печатного контакта // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 1 (278). С. 52–57.

Научное издание

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.  
ФИЗИКА И МАТЕМАТИКА**

**Материалы докладов 90-й научно-технической конференции  
профессорско-преподавательского состава,  
научных сотрудников и аспирантов  
(с международным участием)**

**Электронный ресурс**

В авторской редакции

Компьютерная верстка: *Н.А. Жиляк, Н.В. Ржеутская, Д.И. Волчек,  
О.А. Новосельская, А.А. Якименко, С.В. Бушева, Е.О. Черник*

Усл. печ. л. 16,22. Уч.-изд. л. 16,74.

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.