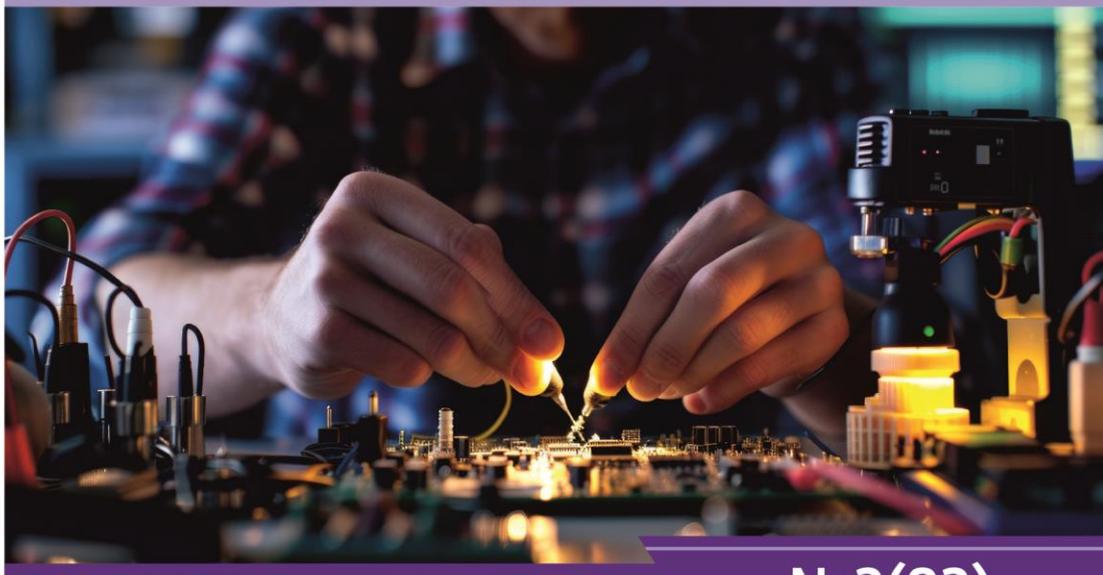




НАУЧНЫЙ  
ФОРУМ  
nauchforum.ru

ISSN: 2541-8394



№3(83)

**НАУЧНЫЙ ФОРУМ:  
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-  
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

МОСКВА, 2025



# НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Сборник статей по материалам LXXXIII международной  
научно-практической конференции*

№ 3 (83)  
Апрель 2025 г.

Издается с декабря 2016 года

Москва  
2025

УДК 51/53+62

ББК 22+3

Н34

Председатель редколлегии:

*Лебедева Надежда Анатольевна* – доктор философии в области культурологии, профессор философии Международной кадровой академии, член Евразийской Академии Телевидения и Радио.

Редакционная коллегия:

*Данилов Олег Сергеевич* – канд. техн. наук, научный сотрудник Дальневосточного федерального университета;

*Маршалов Олег Викторович* – канд. техн. наук, начальник учебного отдела филиала ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), Россия, г. Златоуст.

**Н34 Научный форум: Технические и физико-математические науки:** сб. ст. по материалам LXXXIII междунар. науч.-практ. конф. – № 3 (83). – М.: Изд. «МЦНО», 2025. – 108 с.

ISSN 2541-8394

Статьи, принятые к публикации, размещаются на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

ISSN 2541-8394

ББК 22+3

© «МЦНО», 2025

<b>Оглавление</b>	
<b>Доклады конференции на русском языке</b>	<b>5</b>
<b>Технические науки</b>	<b>5</b>
<b>Раздел 1. Технические науки</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Авиационная и ракетнокосмическая техника</b>	<b>5</b>
ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	5
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ФОРМ	
КОРРОЗИИ САМОЛЕТОВ	
Ерболат Куаныш Ғабитұлы	
Карнибаев Салиакын Жұмадалиевич	
<b>1.2. Информатика, вычислительная техника и управление</b>	<b>22</b>
РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОСЕРВИСНЫХ	22
АРХИТЕКТУР ДЛЯ ОБЛАЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ	
Дурнов Евгений Иванович	
ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА РЫНКА ТРУДА	27
IT-СПЕЦИАЛИСТОВ	
Лункина Оксана Леонтьевна	
<b>1.3. Metallургия и материаловедение</b>	<b>33</b>
ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРЕБРА НА СТАДИИ	33
ЦИАНИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗА СЧЕТ	
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ	
СУСПЕНЗИИ АВТОКЛАВИРОВАНИЯ	
Васильев Роман Евгеньевич	
АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ	38
ОБРАБОТКИ СТАЛИ 65Г	
Косанова Индира Муратовна	
<b>1.4. Радиотехника и связь</b>	<b>44</b>
ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МЕТАМАТЕРИАЛЬНОЙ	44
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ НА РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ	
ПРОПУСКАНИЯ И УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК	
РУПОРНОЙ АНТЕННЫ: ПРОБЛЕМНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ	
АНАЛИЗ	
Магомедкеримов Руслан Гераклиевич	
Лобов Матвей Васильевич	
<b>1.5. Строительство и архитектура</b>	<b>50</b>
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМАНА	50
В ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КАК ЭКОЛОГИЧНОГО И	
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО МАТЕРИАЛА	
Бурков Илья Викторович	

<b>1.6. Транспорт</b>	<b>54</b>
МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОСЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВ	54
Баубек Нұркелді Нұрбекұлы Шопанова Гүлжан Ережеповна	
<b>1.7. Химическая технология</b>	<b>60</b>
АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ PSA В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭТИЛЕНА	60
Рахимли Фазил Радиг	
<b>1.8. Энергетика</b>	<b>66</b>
КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЗОНЫ НАДЕЖНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА K-СРЕДНИХ НА НЕЙРОННЫХ ПРОЦЕССОРАХ	66
Крупенёв Дмитрий Сергеевич Бояркин Денис Александрович Груздева Татьяна Владимировна	
ПОВЫШЕНИЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ АСУ ТП НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОДИОДОВ	76
Шакирьянов Эдуард Данисович Чаинская Регина Алижановна	
<b>Раздел 2. Математика</b>	<b>84</b>
<b>2.1. Теория вероятностей и математическая статистика</b>	<b>84</b>
ОБ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЯХ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ	84
Гордеев Иван Иванович Касмынин Борис Павлович	
<b>Қазақ тіліндегі конференция баяндамалары</b>	<b>100</b>
<b>Техникалық ғылымдар</b>	<b>100</b>
<b>1-Бөлім «Техникалық ғылымдар»</b>	<b>100</b>
<b>1.1. Аспаптар, метрология және ақпараттық-өлшеу құрылғылары мен жүйелері</b>	<b>100</b>
БИОИНЖЕНЕРИЯ: ҒЫЛЫМДАҒЫ РЕВОЛЮЦИЯ	100
Асқар Жулдыз	

## ДОКЛАДЫ КОНФЕРЕНЦИИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

### РАЗДЕЛ 1.

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

#### 1.1. АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНОКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

##### ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ФОРМ КОРРОЗИИ САМОЛЕТОВ

*Ерболат Куаныш Фабитұлы*

*магистрант*

*кафедры авиационной техники и технологии,*

*Академии Гражданской Авиации*

*Казахстан, г. Алматы*

*Карнибаев Салиакын Жұмадалиевич*

*научный руководитель,*

*канд. техн. наук, профессор кафедры*

*авиационной техники и технологии*

*Академии Гражданской Авиации,*

*Казахстан, г. Алматы*

##### CURRENT STATE OF RESEARCH INTO MODELLING COMMON FORMS OF AIRCRAFT CORROSION

*Kuanysh Yerbolat*

*Master's student,*

*Department of Aviation*

*Engineering and Technology Academy*

*of Civil Aviation,*

*Kazakhstan, Almaty*

**Saliakyn Karnibayev**

*Supervisor,  
Ph.D. in Technical Sciences, Professor,  
Department of Aviation  
Engineering and Technology Academy  
of Civil Aviation  
Kazakhstan, Almaty*

**Аннотация.** В статье анализируются современные методы моделирования коррозии в авиаконструкциях. Рассмотрены ключевые подходы к компьютерному моделированию гальванической, щелевой и точечной коррозии с использованием современных вычислительных методов. Особое внимание уделено взаимосвязи между теоретическими моделями и их экспериментальной верификацией. Показаны перспективы развития данного научного направления для практического применения в авиационной промышленности. Результаты исследования могут быть использованы для повышения точности прогнозирования коррозионных повреждений и продления срока службы авиационных конструкций.

**Abstract.** The article analyzes modern methods for modeling corrosion in aircraft structures. It examines key approaches to computer simulation of galvanic, crevice, and pitting corrosion using advanced computational methods. Special attention is given to the relationship between theoretical models and their experimental verification. The prospects for developing this research field for practical applications in aviation industry are outlined. The study results can be used to improve corrosion damage prediction accuracy and extend service life of aircraft structures.

**Ключевые слова:** моделирование коррозии, конечный элемент, граничный элемент, динамический интерфейс

**Keywords:** corrosion modelling, finite element, boundary element, dynamic interface

Коррозионная стойкость самолета закладывается при проектировании, реализуется при производстве, поддерживается при техническом обслуживании и восстанавливается при капитальном ремонте.

Поэтому рассмотрение вопросов коррозии воздушных судов необходимо осуществлять системно на протяжении всего жизненного цикла самолета.

Проблемы в любом звене могут привести к «эффекту бочки» и напрямую повлиять на срок службы самолета.

В настоящее время проектирование защиты самолетов от коррозии в основном опирается на данные, накопленные существующими моделями, и опыт конструкторов, чтобы сначала спроектировать, а затем проверить его эффективность с помощью испытаний, что неэффективно и дорого для оценки. С непрерывным развитием компьютерных технологий и электрохимической теории коррозии непрерывное совершенствование привело к появлению технологии моделирования коррозии.

Эта технология основана на электрохимических принципах, путем тестирования поляризационных свойств материалов в различных условиях эксплуатации, использование конечных элементов или граничных элементов для прогнозирования коррозии структуры самолета коррозии место и степень коррозии в относительно короткий период времени, может значительно повысить самолет коррозии предотвращения проектных возможностей, обогатить методы оценки коррозии, в сочетании с соответствующей экспериментальной проверки модели, чтобы исправить, но также может быть непосредственно применен ко всему самолету прогнозирования коррозии, чтобы достичь всестороннего рассмотрения коррозии с системной точки зрения, а затем проверить свою эффективность путем тестирования, коррозии прогнозирования эффективности и высокой стоимости.

Он также может быть непосредственно применен к прогнозированию коррозии всего самолета, чтобы достичь цели всестороннего рассмотрения конструкции предотвращения коррозии самолета с системной точки зрения, тем самым устраняя ограничения оценки местных ключевых компонентов и достигая цели предсказуемой коррозии самолета.

Суть моделирования коррозии заключается в использовании математических методов для численного моделирования и расчета коррозионных повреждений.

По этой причине для моделирования коррозии были применены многие передовые математические методы, такие как нейронная сеть BP, машина опорных векторов [1] и т. д., и был достигнут определенный прогресс. Однако этот тип метода моделирования в основном использует состав металла, факторы окружающей среды, время и т. д. в качестве входных данных, а скорость коррозии, глубину коррозионных язв и т. д. в качестве выходных данных и подходит для одного металла. Более того, расчет модели часто требует большого количества инженерных данных в качестве поддержки, что требует чрезвычайно большого количества и качества данных. Обработка данных является

объемной и трудоемкой задачей, поэтому имеет определенные ограничения при разработке.

С развитием электрохимической теории и компьютерных технологий методы моделирования методом конечных элементов или граничных элементов, основанные на электрохимических принципах, постоянно применяются для моделирования распространенных форм коррозии самолетов, таких как гальваническая коррозия, шелевая коррозия, точечная коррозия и т. д.

#### 1 Гальваническая коррозия

Чтобы удовлетворить требования к легкости или прочности конструкции в процессе проектирования самолета, конструкторам часто приходится сочетать различные материалы, такие как муфты сталь-алюминий и алюминий-композит. Хотя такая форма соединения может позволить самолету удовлетворить требования к расчету прочности, поскольку разные материалы имеют разные электрохимические свойства, их соединение может легко вызвать гальваническую коррозию, что приведет к ускоренному ухудшению характеристик конструкции [2].

В этом случае более электрохимически активный материал (анод) будет корродировать с большей скоростью, поскольку материал с более высоким потенциалом (катод) подает катодный ток.

Такое ускоренное растворение металла, которое может быть локализованным или происходить в широких пределах, может существенно ухудшить механические свойства конструкции, что приведет к разрушению конструкции (разрушение, усталость и т. д.) или потере функции (протечки, перфорация).

Поэтому с точки зрения надежности проектирования и эксплуатации металлоконструкций крайне важно точно спрогнозировать зону возникновения гальванической коррозии и скорость коррозионной реакции.

#### 1.1 Построение модели

С 1950-х годов Вабер и др. [3] начали проводить серию моделирования гальванической коррозии. Однако из-за незрелости компьютерных технологий в то время модели были относительно простыми. После вступления в XXI век, с быстрым развитием технологий обнаружения коррозии и постепенным усовершенствованием теории коррозии, моделирование коррозии стало постепенно признаваться учеными и стремительно развиваться. В частности, моделирование гальванической коррозии стало в той или иной степени применяться в сферах авиации, автомобилестроения, нефтехимии и т. д. В настоящее время исследования по моделированию гальванической коррозии можно условно разделить на два типа: моделирование атмосферной

коррозии и моделирование иммерсионной коррозии, основанное на различных формах электролита на поверхности электродов:

1. Построение модели атмосферной (тонкой пленки жидкости) гальванической коррозии.

Коррозия конструкций самолетов, обслуживающих прибрежные районы и острова, в основном вызвана атмосферной коррозией, которая по существу представляет собой электрохимическую коррозию под разной толщиной пленки жидкости [4]. Отличие от иммерсионной коррозии состоит в том, что различная форма пленки жидкости существенно повлияет на процесс массопереноса электродной реакции, что окажет большее влияние на коррозионное поведение металлов. По формам пленок жидкости при атмосферной коррозии в основном подразделяются на статически стабильные пленки жидкости, динамические пленки жидкости, пленки дисперсной жидкости и т. д. В настоящее время большинство исследований по имитационному моделированию атмосферной коррозии основано на статически стабильных пленках жидкости [5]. По сравнению с исследованиями в состоянии погружения, исследований по-прежнему недостаточно.

В основном это ограничивается тремя трудностями: во-первых, трудно проверить электрохимические свойства металлов под тонкими пленками жидкости, используя традиционные методы тестирования. Не только сложно настроить электрод сравнения и противоэлектрод в состоянии жидкой пленки, но и низкая надежность результатов измерений. Во-вторых, сложно построить геометрически сложные тонкие пленки жидкости. Принято считать, что толщина пленки жидкости менее 1 мм относится к категории атмосферной коррозии [6]. Во влажной атмосфере или влажной атмосфере толщина пленки жидкости обычно составляет менее 100 мкм.

Как добавить непрерывные и различной толщины исследовательские области электролита на поверхность сложных структур, является трудностью при моделировании методом конечных элементов или граничных элементов. В-третьих, трудно проверить или корректировать результаты моделирования. Чтобы проиллюстрировать точность результатов моделирования, часто необходимо разработать соответствующие эксперименты для проверки. Поскольку толщина тонких пленок жидкости обычно находится в микронном диапазоне, часто бывает трудно добиться стабильной пленки жидкости, соответствующей результатам моделирования в процессе испытаний.

На жидкую пленку в природной среде влияет изменчивая газовая фаза. Он будет испаряться и становиться тоньше в среде с низкой влажностью, а также загустеет из-за конденсации водяного пара в сре-

де с высокой влажностью. Толщина жидкой пленки демонстрирует возвратно-поступательное динамическое изменение. Когда толщина пленки жидкости уменьшается, поверхностное натяжение увеличивается, в результате чего пленка жидкости отделяется и превращается в несколько небольших кусочков пленки жидкости, которые диспергируются. Утолщение пленки жидкости приведет к повторному агрегированию дисперсной пленки жидкости в целую пленку жидкости под действием силы тяжести, тем самым уменьшая дисперсию всей пленки жидкости. Изменение толщины и дисперсности динамических пленок жидкости приведет к изменению скорости коррозии металла под пленкой жидкости, причем изменения будут чрезвычайно большими, что также окажет существенное влияние на механизм коррозии пленки жидкости. Существует множество влияющих факторов, которые приводят к изменениям в поведении динамической коррозии пленки жидкости, и правила трудно измерить. Поэтому в настоящее время опубликовано очень мало результатов исследований по имитационному моделированию динамических пленок жидкости. Только Симиллион и др. [7] опубликовали соответствующие статьи в 2016 году, соответственно, в которых обсуждается влияние геометрии пленки жидкости и динамических изменений толщины пленки жидкости, вызванных испарением, на коррозию. Это также может дать новую исследовательскую идею для динамического моделирования атмосферной коррозии.

Чтобы проверить результаты прогнозирования модели атмосферной гальванической коррозии, многие исследователи провели лабораторные испытания на коррозию или полевые испытания на испытательных образцах и сравнили результаты коррозии с результатами прогнозирования модели.

2. Построение модели гальванической коррозии в состоянии погружения.

Конструкция самолета сложна, и в некоторых местах из-за неправильной конструкции может быть плохой дренаж. Местное скопление воды из-за дождя, снегопада, чистки самолета и других факторов может легко вызвать коррозию при погружении в раствор.

По сравнению с атмосферной коррозией ранее было исследовано моделирование гальванической коррозии в состоянии погружения. Это связано с тем, что условия коррозионных испытаний в состоянии погружения легко контролировать, основные данные для моделирования легко получить, а результаты испытаний легко проверяемы. С 1950-х годов по настоящее время модель гальванической коррозии под погружением претерпела процесс постоянного совершенствования и обогащения от простоты к сложности и постепенно получила признание.

Особенно за последнее десятилетие работа по моделированию гальванической коррозии достигла беспрецедентного развития. В настоящее время модели гальванической коррозии можно условно разделить на пять категорий.

Категория 1: Модель гальванической коррозии, которая определяет распределение потенциала и плотности тока на основе потенциального уравнения Лапласа и закона Ома, а затем рассчитывает глубину коррозии на основе закона Фарадея [8]. Этот тип модели предполагает, что концентрация частиц на поверхности электрода такая же, как концентрация тела раствора. Концентрация ионов в растворе не влияет на проводимость раствора электролита. То есть проводимость считается фиксированной величиной. Обычно он подходит для крупных деталей конструкции без длинных и узких зазоров.

Категория 2: Модель, которая определяет потенциал, плотность тока и распределение концентрации частиц на основе предположений о сохранении вещества и электронейтральности, а затем рассчитывает глубину коррозии на основе закона Фарадея [9]. Этот тип модели обычно делится на два типа: один предназначен для фиксации проводимости и расчета распределения концентрации, а другой — для расчета распределения концентрации на основе предположения об электронейтральности. Этот тип модели обычно подходит для ситуаций, когда в конструкции имеется длинный и узкий зазор, а внутри и снаружи зазора возникает разница концентраций, которая влияет на реакцию коррозии.

Категория 3: Модель гальванической коррозии с учетом эффекта стерических препятствий продуктов коррозии [10]. Этот тип модели является усовершенствованием модели второго типа с учетом тормозящего влияния осаждения продуктов на коррозию.

Категория 4: Модель гальванической коррозии, учитывающая влияние динамических изменений интерфейса на коррозию [11]. Этот тип модели учитывает влияние на коррозию, вызванное изменением соотношения площадей катода и анода, вызванным движением коррозионной границы раздела, и является детальным дополнением к первым трем типам моделей. В настоящее время в области моделирования коррозии отслеживание динамического интерфейса по-прежнему остается актуальной исследовательской проблемой.

Категория 5: Модель гальванической коррозии на основе случайного распределенных катодов и анодов. Этот тип модели появился относительно поздно. В настоящее время в основном вводятся случайные функции для случайного размещения катодов и анодов в разное время

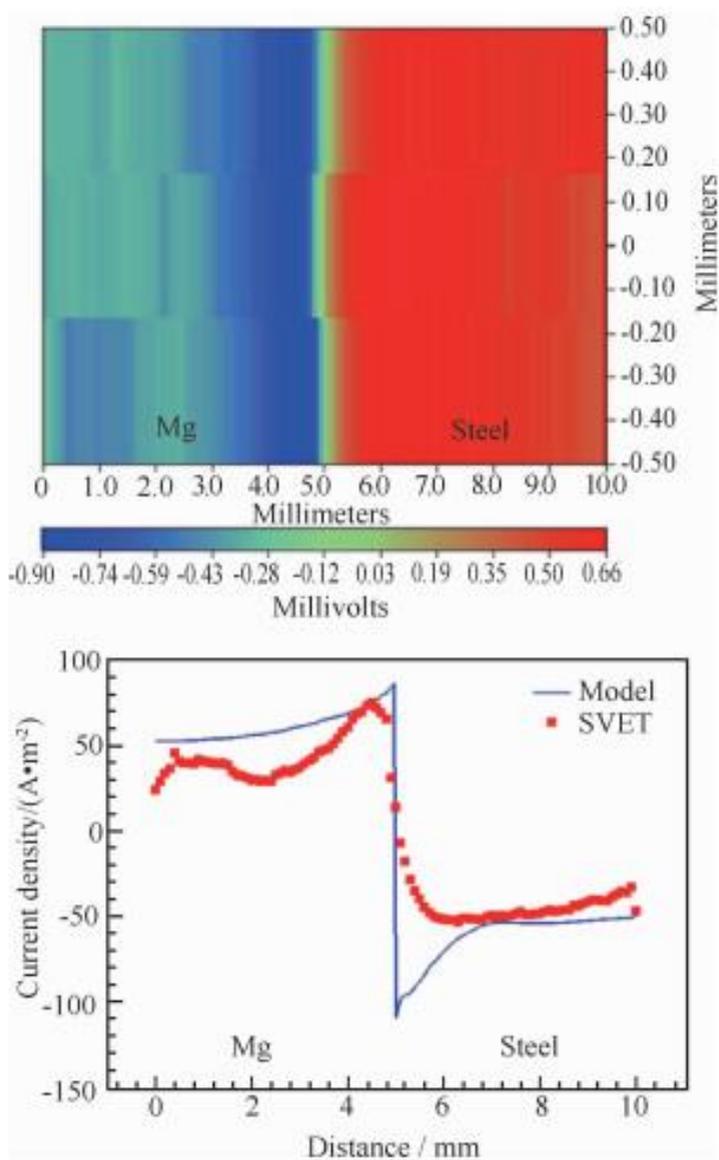
на одном и том же интерфейсе. Затем на основе модели первого типа рассчитывается изменение коррозионной границы раздела во времени.

### 1.2 Применение передовых методов обнаружения для определения

В настоящее время наиболее распространёнными устройствами для проверки точности моделей гальванической коррозии являются сканирующий Кельвин-зонд (Scanning Kelvin Probe, SKP), сканирующий вибрирующий электрод (Scanning Vibration Electrode Technology, SVET), массивы электродов [12], а также оборудование для анализа продуктов коррозии (рентгеновская дифракция (X-Ray Diffraction, XRD), энергодисперсионный спектрометр (Energy Dispersive Spectrometer, EDS)).

Сканирующий Кельвин-зонд — это бесконтактная, неразрушающая технология измерения потенциала поверхности металла в газовой среде, основанная на принципе колебательной ёмкости. Она в основном используется для сравнения распределения потенциалов, полученных в результате моделирования и экспериментальных измерений.

Сканирующий вибрирующий электрод использует вибрирующий электрод и фазовый детектор для линейного или поверхностного сканирования плотности тока на образце. Этот метод применяется для проверки соответствия между смоделированной и фактической плотностью тока. Например, Дешпанде использовал SVET для сканирования поверхности магний-сталь и магний-алюминий-сталь с шагом 0,5 мм × 0,5 мм и провёл сравнительный анализ с результатами моделирования, как показано на рисунке 1.



**Рисунок 1. Сравнение гальванической коррозии магния и стали SVET и моделирования**

### 1.3 Применение моделирования гальванической коррозии

С непрерывным прогрессом в материаловедении и улучшением характеристик новых материалов, высокопроизводительные материалы всё чаще используются в проектировании самолётов. Многокомпонентные металлические соединения стали обычным явлением, особенно для крепёжных элементов. При выборе материалов для удовлетворения требований прочности и лёгкости часто трудно учесть факторы коррозии, что создаёт значительные проблемы для технического обслуживания и ремонта самолётов во время эксплуатации. Коррозия конструкций самолётов в основном возникает в местах соединения металлов и вокруг крепёжных элементов, где из-за контакта разнородных металлов легко развивается гальваническая коррозия.

Моделирование гальванической коррозии, разрабатываемое и совершенствуемое более полувека, в настоящее время достигло относительно высокой зрелости в прогнозировании мест коррозии, её зон и даже глубины повреждений. Результаты исследований успешно применяются в авиационной отрасли многих развитых стран, включая США и Европу, и публикуются в виде монографий, научных статей и докладов на конференциях.

Одним из наиболее подробных описаний применения моделирования коррозии в авиации является монография Дерозе [13] из Швейцарского федерального института материаловедения и технологий (2013 г.) под названием «*Коррозия алюминиевых сплавов в конструкциях самолётов: моделирование и симуляция*». В ней систематически представлены макро-, микро- и мезоскопические методы моделирования коррозии в алюминиевых сплавах авиационных конструкций, что свидетельствует о начале активного использования этого подхода в Европе. В том же году доктор Палани [14] провёл серию исследований с использованием программного обеспечения Veasy для моделирования коррозии в соединениях углепластика и алюминиевого сплава 2024 в атмосферных условиях и при погружении в растворы.

Снихирова и соавт. расширили область применения моделей коррозии, используя их для прогнозирования гальванической коррозии в соединениях Ti6Al4V-AA2024 в авиационных конструкциях. Их модель учитывает влияние продуктов коррозии на перенос частиц и изменение локального уровня pH, а также подчёркивает важность самопроизвольной коррозии сплава AA2024 в гальванических парах. Для проверки точности результатов Снихирова и коллеги применили передовые методы измерений, включая дифференциальную визуализацию и SVET, чтобы собрать данные и верифицировать разработанную модель.

## 2 Щелевая коррозия

В авиационных конструкциях присутствует множество металлических соединений, таких как стыки листовых материалов и области крепления элементов, где щелевая коррозия практически неизбежна. Моделирование щелевой коррозии существенно сложнее моделирования гальванической коррозии, поскольку геометрия зазора ограничивает транспорт частиц (например, кислорода), создавая разность концентраций между внутренней и внешней частью щели и тем самым ускоряя коррозионные процессы. Дополнительными критически важными факторами, влияющими на точность прогнозирования, являются геометрические деформации щели и накопление продуктов коррозии в её устьевой части.

Пионерские работы по математическому моделированию физики щелевой коррозии были выполнены Шарландом и Таскером [15], а также Уолтоном ещё в 1980-х годах. В 1990-х годах Шарланд значительно расширил эти исследования, разработав прогностическую модель эволюции ионной концентрации и электрического потенциала в металлических зазорах. Эта модель, основанная на физико-химических механизмах локальной активации при разрушении пассивной плёнки, учитывает процессы ионной миграции и химические реакции. Валидация модели на экспериментальных данных из различных источников показала её способность качественно воспроизводить коррозионные процессы, а в ряде случаев - и количественно их описывать. Однако предположение о разбавленности растворов привело к существенным погрешностям при моделировании коррозии в концентрированных электролитах.

До начала XXI века, в силу ограниченного понимания механизмов щелевой коррозии, исследования преимущественно фокусировались на процессах массопереноса в зазорах, рассматривая лишь действие концентрационных элементов, обусловленных градиентами ионов металлов и кислорода. В этот период отсутствовали модели, учитывающие совместное влияние эффекта автоокисления (окклюзионного автокатализа) и кислородных концентрационных элементов. Кроме того, ограниченные вычислительные возможности того времени не позволяли адекватно моделировать динамику изменения границ раздела фаз, вызванную процессами активного растворения и осаждения продуктов коррозии.

Начиная с 2010 года, исследования в области моделирования щелевой коррозии получили стремительное развитие как в отечественной, так и в зарубежной науке. В этот период в практику моделирования были внедрены современные математические подходы, в частности методы

отслеживания подвижных границ раздела, такие как level-set и фазовое поле.

Значительный вклад в эту область внесли следующие работы:

- В исследовании была предложена произвольная лагранжево-эйлерова модель для имитации динамического процесса развития щелевой коррозии во временной области. Данная модель позволяет рассчитывать распределение потенциала и концентрации частиц в зазоре, а также отслеживать геометрические изменения границы раздела, вызванные активным растворением и осаждением продуктов коррозии.

- В работе разработан численный метод моделирования электрохимических условий в щелях и питтингах, вызванных гальванической коррозией в водной среде. Метод основан на расширенном методе конечных элементов (XFEM) для дискретизации безразмерных управляющих уравнений, с использованием функции level-set для описания морфологии границы раздела независимо от базовой конечно-элементной сетки.

- Исследование продемонстрировало применение фазового поля для моделирования щелевой коррозии железа в морской воде. Модель учитывает шесть типов ионов и соответствующие химические реакции, позволяя рассчитывать временные распределения ионных концентраций и потенциала в электролите, а также распределения таких параметров, как перенапряжение, рН и скорость коррозии при различных потенциалах металла.

### 3 Точечная коррозия

Точечную коррозию можно разделить на открытую питтинговую коррозию (рис. 2(а)) и закрытую питтинговую коррозию (рис. 2(б)) в зависимости от формы очага коррозии. Среди них раствор электролита в очаге открытой коррозии легко вытекает наружу, а внутренняя поверхность очага коррозии снова пассивируется, что останавливает расширение очага коррозии. Однако при коррозии с закрытыми очагами Cl<sup>-</sup> будет проникать извне в очаг коррозии, концентрироваться и гидратироваться, вызывая постоянное снижение рН раствора электролита в очаге коррозии, тем самым ускоряя непрерывное расширение очага коррозии [2].



При контакте с матрицей Al они образуют микрогальванические пары, вызывая либо активное растворение матрицы, либо собственную коррозию.

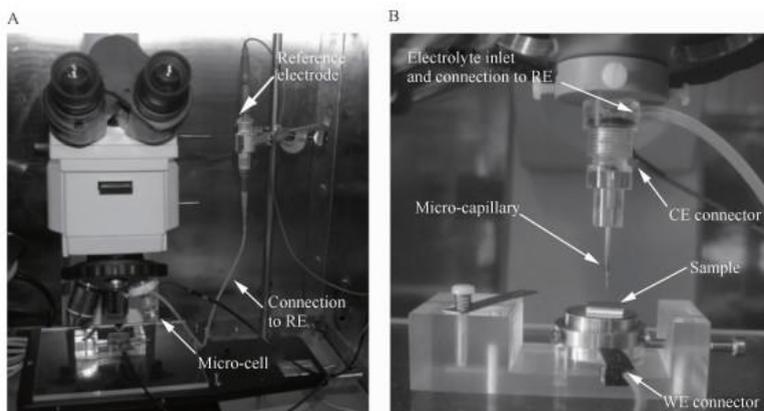
Моделирование зарождения точечной коррозии на основе таких микрогальванических пар появилось сравнительно недавно.

Это связано главным образом с тем, что размеры большинства IMPs составляют микронный масштаб, что затрудняет измерение их электрохимических характеристик.

Только в начале XXI века появились соответствующие технологии микроэлектродных измерений [16] (рис. 3).

На их основе были проведены исследования электрохимических свойств интерметаллидных фаз в алюминиевых и магниевых сплавах, что заложило основу для моделирования зарождения точечной коррозии.

В 2011 году Дешпанде предложил метод level-set для различения микроанодных и микрокатодных зон на одной поверхности, проанализировав коррозионное поведение  $\beta$ -фазы вокруг  $\alpha$ -фазы как в непрерывном, так и в дискретном вариантах. Это создало необходимые предпосылки для дальнейшего развития моделей зарождения точечной коррозии. Последующие исследования также внесли вклад в эту область.



**Рисунок 3. Микроэлектродное электрохимическое измерительное устройство**

3.2 Моделирование развития точечной коррозии (метастабильное и стабильное развитие)

В настоящее время моделирование развития точечной коррозии обычно предполагает, что пассивная пленка уже имеет дефекты, то

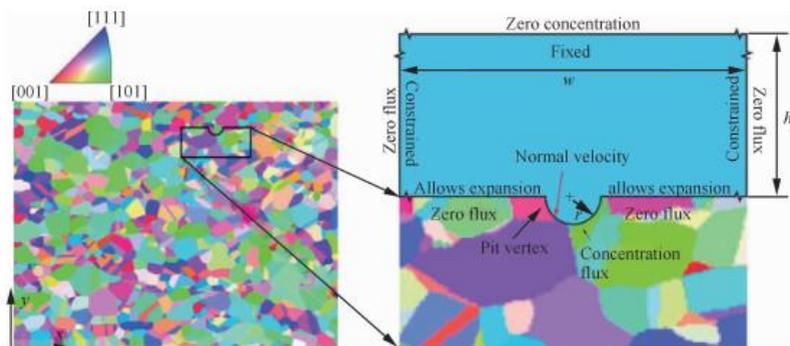
есть не учитывает стадию зарождения, а сразу переходит к моделированию развития точечной коррозии.

Такие модели направлены на описание процесса развития отдельной коррозионной ямки и обычно основаны на законах переноса и электрохимической кинетики для расчета геометрической эволюции коррозионной ямки и распределения ионных концентраций во всей ямке, что имеет значительное сходство с моделированием щелевой коррозии.

Поскольку такое моделирование не требует измерений микро-электрохимических характеристик, оно появилось относительно рано. Еще в 1980-х годах Шарланд и Таскер разработали его теоретическую модель.

В XXI веке различные передовые методы, такие как метод конечных объемов, клеточные автоматы, метод фазового поля, перидинамика и другие, были применены в имитационном моделировании, что значительно расширило методический арсенал.

Кроме того, различные формы повреждения пассивной пленки и различная ориентация зерен (рис. 4) также оказывают значительное влияние на развитие точечной коррозии.



**Рисунок 4. Имитационное моделирование различных ориентаций зерен**

Проведенный анализ современных подходов к моделированию коррозионных процессов в авиационных конструкциях позволяет сделать ряд важных выводов. Развитие вычислительных методов и экспериментальных технологий привело к значительному прогрессу в понимании механизмов гальванической, щелевой и точечной коррозии.

Современные модели коррозионных процессов достигли высокой степени детализации, позволяя учитывать как макроскопические электрохимические процессы, так и микроструктурные особенности материалов.

Особенно следует отметить успехи в моделировании точечной коррозии, где удалось разделить описать процессы зарождения и развития повреждений, а также установить ключевую роль микронеоднородностей материала.

Применение передовых численных методов, таких как метод фазового поля, клеточные автоматы и перидинамика, открыло новые возможности для более точного прогнозирования коррозионных повреждений.

Эти методы позволяют учитывать сложные физико-химические взаимодействия и моделировать эволюцию повреждений в реальном масштабе времени.

Особую ценность представляют разработанные подходы к экспериментальной верификации моделей с использованием современных измерительных технологий.

Это обеспечивает необходимую достоверность прогностических расчетов и возможность их практического применения.

Дальнейшее развитие исследований в этом направлении должно быть сосредоточено на создании комплексных мультидисциплинарных моделей, объединяющих различные виды коррозии и учитывающих реальные условия эксплуатации авиационных конструкций. Решение этих задач будет способствовать повышению надежности и безопасности авиационной техники.

### Список литературы:

1. LMENEZCOME M J, TURIAS I J, RUIZAGUILAR J J, et al. Комплексный подход на основе SVM для моделирования поведения питтинговой коррозии нержавеющей стали EN 1.4404. *Материалы и коррозия*, 2014, 65(10): 1024-1032.
2. СНИХИРОВА Д., ХОЧЕ Д., ЛАМАКА С., и др. Гальваническая коррозия соединений Ti6Al4V-AA2024 в авиационной среде: Моделирование и экспериментальная проверка. *Corrosion Science*, 2019, 157: 70-78.
3. WABER J T, FAGAN B. Математические исследования гальванической коррозии. 4. влияние толщины электролита на распределение потенциала и тока по компланарным электродам с использованием параметров поляризации. *Journal of the Electrochemical Society*, 1956, 103(1): 64-72.
4. WANG J. *The role of liquid film morphology in Atmospheric Corrosion*. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 68-69.

5. THEBAULT F, VUILLEMIN B, OLTRA R, et al. Моделирование биметаллической коррозии под тонкими пленками электролита. *Corrosion Science*, 2011, 53: 201-207.
6. CHEN Y L, HUANG H L, ZHANG Y, et al. A method of atmospheric corrosion prediction for aircraft structure. *Materials and Corrosion*, 2019, 70(1): 79-90.
7. SIMILLION H, DEN STEEN N V, TERRY N, et al. Влияние геометрии на коррозию в динамических тонкопленочных электролитах. *Electrochimica Acta*, 2016, 209: 149-158.
8. KING A D, LEE J S, SCULLY J R. Анализ методом конечных элементов распределения тока и потенциала в гальванической паре между Mg и 2024-T351 в конфигурации грунтовок с высоким содержанием Mg. *Journal of the Electrochemical Society*, 2016, 163(7): C342-C356.
9. MURER N, OLTRA R, VUILLEMIN B, et al. Численное моделирование гальванической связи в алюминиевых сплавах: Обсуждение применения методов локального зондирования. *Corrosion Science*, 2010, 52: 130-139.
10. HOUCHE D. Моделирование роста слоя отложений продуктов коррозии на голом магнии, гальванически соединенном с алюминием. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162(1).
11. WILDER J W, CLEMONS C, GOLOVATY D, et al. Адаптивный подход с множеством уровней для моделирования повреждений, вызванных гальванической коррозией. *Журнал инженерной математики*, 2015, 91(1): 121-142.
12. SHAIK L A, THAMIDA S K. Эволюция поверхности корродирующего металла как задача с движущейся границей при случайном назначении анодных и катодных участков. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2016, 780: 264-270.
13. DEROSE J A. Коррозия алюминиевых сплавов в авиационных конструкциях: моделирование и имитация. Саутгемптон: WIT Press, 2013.
14. PALANI S. Моделирование гальванической коррозии гибридных конструкций в самолетах. Брюссель: Université Libre de Bruxelles, 2013.
15. SHARLAND S M, TASKER P W. Математическая модель щелевой и точечной коррозии-I. Физическая модель. *Corrosion Science*, 1988, 28(6): 603-620.
16. GUSEVA O, DEROSE J A, SCHMUTZ P. Моделирование временной зависимости ранней стадии локализованной коррозии в алюминиевых сплавах. *Electrochimica Acta*, 2013, 88: 821-831.

## 1.2. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

### РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ МИКРОСЕРВИСНЫХ АРХИТЕКТУР ДЛЯ ОБЛАЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

*Дурнов Евгений Иванович*

*магистрант,*

*Херсонский государственный педагогический университет,*

*РФ, г. Херсон*

### DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF MICROSERVICE ARCHITECTURES FOR CLOUD APPLICATIONS

*Evgeny Durnov*

*Master's student,*

*Kherson state pedagogical university,*

*Russia, Kherson*

**Аннотация.** В статье рассматриваются принципы разработки микросервисных архитектур для облачных приложений, а также методы оптимизации их работы. Проанализированы ключевые проблемы интеграции, масштабирования и управления сервисами, предложены практические решения, направленные на повышение отказоустойчивости и производительности.

**Abstract.** The principles of developing microservice architectures for cloud applications, as well as methods for optimizing their performance, are examined in the article. Key issues of integration, scaling, and service management are analyzed, and practical solutions aimed at improving fault tolerance and performance are proposed.

**Ключевые слова:** микросервисы; облачные приложения; оптимизация; масштабирование; отказоустойчивость.

**Keywords:** microservices; cloud applications; optimization; scaling; fault tolerance.

Современные информационные системы стремительно развиваются, и потребности бизнеса требуют высокой гибкости, масштабируемости и надежности программных решений. Одной из наиболее перспективных парадигм разработки является микросервисная архитектура, которая позволяет разбивать сложные приложения на набор небольших, независимо развертываемых и масштабируемых сервисов. В данной статье рассматриваются принципы построения микросервисных архитектур для облачных приложений, а также вопросы оптимизации, направленные на повышение их производительности и отказоустойчивости.

В условиях цифровой трансформации и роста объема обрабатываемых данных традиционные монолитные архитектуры уже не удовлетворяют требованиям динамичных бизнес-процессов. Микросервисная архитектура предоставляет возможность разрабатывать приложения, где каждая бизнес-функция реализована отдельным сервисом, что упрощает их обновление, тестирование и масштабирование. Помимо этого, переход к облачным технологиям позволяет эффективно использовать распределенные вычислительные ресурсы, что способствует снижению затрат и увеличению оперативности реагирования на изменения в рабочей нагрузке.

Микросервисная архитектура строится на ряде ключевых принципов, среди которых можно выделить следующие:

- *Декомпозиция приложения.* Каждая функциональная единица реализуется как отдельный сервис, что позволяет обновлять и масштабировать части приложения независимо друг от друга.
- *Независимость разработки и развертывания.* Разработчики могут работать над отдельными сервисами, используя разные технологические стеки, а система развертывания позволяет осуществлять непрерывную интеграцию и доставку обновлений без остановки работы всего приложения.
- *Стандартизованные интерфейсы взаимодействия.* Взаимодействие между сервисами осуществляется через API, что обеспечивает модульность и упрощает интеграцию с внешними системами.
- *Контейнеризация и виртуализация.* Применение контейнерных технологий, таких как Docker и Kubernetes, позволяет стандартизировать процесс развертывания и обеспечить масштабируемость при динамичных изменениях нагрузки.

Важным аспектом разработки микросервисных систем является обеспечение надежного взаимодействия между сервисами, что достигается за счет использования шаблонов проектирования, таких как шина сообщений, брокеры событий и API-шлюзы.

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение микросервисной архитектуры сопряжено с рядом технических и организационных сложностей:

- *Сетевая латентность и отказоустойчивость.* При распределенном характере взаимодействия между сервисами особое внимание необходимо уделять сетевым задержкам и возможности отказа одного из сервисов, что может негативно сказаться на общей производительности системы.

- *Мониторинг и логирование.* Учитывая количество отдельных компонентов, централизованное управление логами и мониторинг становится сложной задачей. Современные системы используют распределенные трейсинговые решения и агрегаторы логов для контроля за работой сервисов.

- *Управление данными.* Разделение данных между микросервисами требует внедрения паттернов, позволяющих обеспечить согласованность данных и целостность транзакций в распределенной среде.

- *Оркестрация и автоматизация.* Для эффективного управления множеством сервисов используются системы оркестрации контейнеров, автоматизированные CI/CD конвейеры и средства для балансировки нагрузки.

Рассмотрение данных проблем позволяет выработать стратегии для повышения отказоустойчивости, что особенно актуально для облачных приложений, где сбои в одном сервисе могут привести к деградации работы всей системы.

Для повышения эффективности работы облачных приложений, построенных на микросервисной архитектуре, предлагаются следующие подходы:

Одним из основных методов оптимизации является горизонтальное масштабирование сервисов. При увеличении объема запросов можно динамически добавлять новые экземпляры сервисов. При этом использование балансировщиков нагрузки обеспечивает равномерное распределение запросов между сервисами, что снижает риск возникновения перегрузок и сбоев.

Реализация кэширования данных на уровне сервисов позволяет уменьшить время отклика и снизить нагрузку на базовые системы хранения данных. Важно правильно настроить механизмы кэширования, чтобы обеспечить актуальность и консистентность данных. Дополнительным инструментом является использование асинхронного обмена сообщениями, что позволяет разгрузить систему в периоды пиковых нагрузок.

Непрерывная интеграция и непрерывная доставка обновлений (CI/CD) способствуют быстрому внедрению изменений и обеспечивают высокое качество кода. Использование таких систем, как Jenkins, GitLab CI/CD и других, позволяет автоматизировать тестирование, сборку и развертывание сервисов. Это значительно сокращает время между внесением изменений в код и их появлением в рабочей среде.

Применение контейнерных технологий (например, Docker) и систем оркестрации (например, Kubernetes) позволяет создать стандартизированное и масштабируемое окружение для разработки, тестирования и развертывания микросервисов. Контейнеры обеспечивают изоляцию процессов, что позволяет избежать конфликтов между сервисами и повышает надежность всей системы. Оркестрация контейнеров, в свою очередь, упрощает управление жизненным циклом приложений и обеспечивает автоматическое восстановление при сбоях.

Для своевременного обнаружения и устранения проблем необходимо внедрить систему мониторинга, которая будет собирать и анализировать метрики работы сервисов. Использование инструментов, таких как Prometheus, Grafana, ELK-стек, позволяет получить подробную картину производительности системы, выявлять "узкие места" и оперативно реагировать на инциденты.

Для более наглядного понимания рассмотрим практический пример разработки облачного приложения для интернет-магазина. Приложение включает следующие микросервисы:

- *Сервис аутентификации.* Отвечает за регистрацию и авторизацию пользователей, реализуя протоколы OAuth2 и JWT для безопасного доступа.
- *Каталог товаров.* Обеспечивает хранение и управление информацией о товарах, поддерживая возможность быстрого поиска и фильтрации.
- *Сервис заказов.* Управляет оформлением заказов, обработкой платежей и уведомлениями пользователей.
- *Сервис аналитики.* Сбор данных о поведении пользователей и формирование отчетов для оптимизации бизнес-процессов.

При разработке данного приложения использовались контейнеризация для каждого микросервиса, автоматизированные CI/CD конвейеры и интегрированные системы мониторинга. Полученные результаты показали, что применение микросервисной архитектуры позволило значительно сократить время отклика системы и повысить ее отказоустойчивость за счет независимой масштабируемости компонентов.

Важным этапом реализации проекта стала оптимизация запросов к базе данных. Применение кэширования и распределенной системы хранения данных позволило снизить нагрузку на базовый сервер и обеспечить стабильную работу приложения в периоды пиковых нагрузок.

Разработка и оптимизация микросервисных архитектур для облачных приложений является актуальной задачей в условиях цифровой трансформации. Применение принципов декомпозиции, независимого развертывания, использования стандартизованных API и контейнеризации позволяет создавать гибкие, масштабируемые и отказоустойчивые системы. Решение задач по мониторингу, логированию и оптимизации запросов является ключевым для повышения эффективности работы облачных приложений.

В результате проведенного исследования выявлены основные проблемы, с которыми сталкиваются разработчики микросервисных систем, а также предложены практические подходы для их оптимизации. Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на развитие методов автоматического масштабирования и внедрение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования нагрузки, что позволит еще более эффективно управлять ресурсами облачной инфраструктуры.

### Список литературы:

1. Беллемар, А. Создание событийно-управляемых микросервисов / пер. с англ. — М.: Питер, 2022. — 320 с.
2. Кочер, П. С. Микросервисы и контейнеры Docker / пер. с англ. — М.: ДМК Пресс, 2019. — 350 с.
3. Карнелл, Дж., Санчес, К. Микросервисы Spring в действии / пер. с англ. — М.: ДМК Пресс, 2020. — 384 с.
4. Хорсдал, К. Микросервисы на платформе .NET / пер. с англ. — М.: Вильямс, 2021. — 448 с.
5. Ньюмен, С. От монолита к микросервисам / пер. с англ. — М.: Питер, 2021. — 240 с.
6. Ньюмен, С. Создание микросервисов / пер. с англ. — М.: Питер, 2016. — 312 с.
7. Ричардсон, К. Микросервисы. Паттерны разработки и рефакторинга / пер. с англ. — М.: Питер, 2020. — 432 с.

## ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА РЫНКА ТРУДА ИТ-СПЕЦИАЛИСТОВ

*Лункина Оксана Леонтьевна*

*магистрант,*

*Херсонский государственный педагогический университет,*

*РФ, г. Херсон*

## SOFTWARE SYSTEM FOR ANALYZING THE LABOR MARKET OF IT SPECIALISTS

*Oksana Lunkina*

*Master's student,*

*Kherson state pedagogical university,*

*Russia, Kherson*

**Аннотация.** В статье рассматриваются принципы разработки программной системы для анализа рынка труда IT-специалистов. Система предназначена для автоматизации сбора, обработки и визуализации данных, связанных с трудоустройством, востребованностью различных специализаций, уровнем зарплат и тенденциями развития отрасли. Она будет полезна как HR-специалистам, рекрутерам, так и самим IT-работникам, позволяя принимать обоснованные решения относительно карьеры, поиска работы или подбора персонала.

**Ключевые слова:** программная система, анализ рынка.

### Введение

#### *Актуальность темы:*

Технологический прогресс и цифровизация изменяют рынок труда, что делает необходимость анализа состояния и динамики рынка IT-специалистов более актуальной. Учитывая рост числа вакансий и изменяющиеся требования работодателей, создание программной системы для сбора и обработки данных становится важным. С ростом влияния технологий на различные сферы жизни становится все более важным понимать изменения на рынке труда, особенно в области информационных технологий. Компании нуждаются в качественном анализе, чтобы принимать обоснованные решения о найме и обучении специалистов.

**Цели и задачи исследования:**

Основная цель состоит в создании системы, которая позволит отслеживать и анализировать вакансии, требования, динамику зарплат и другие важные аспекты. Система должна помочь как работодателям, так и соискателям оптимально позиционировать свои роли на рынке труда. Целью данного отчета является разработка концепции программной системы для анализа рынка труда IT-специалистов. Задачи системы включают:

- Сбор и обработка данных о вакансиях.
- Анализ изменений в рынке IT.
- Поддержка работодателей и соискателей в принятии решений.

**Методы исследования:**

Методологическая основа исследования включает статистический анализ имеющихся данных, систематический обзор литературы и применение алгоритмов машинного обучения для выявления трендов. Используемые методы включают анализ статистических данных, опросы, обработку больших данных и методы машинного обучения.

**1. Обзор рынка труда IT-специалистов**Тенденции и статистика:

- Растущее количество вакансий в области IT.
- Наиболее востребованные специальности: разработчики, системные администраторы, специалисты по данным.
- Анализ уровня зарплат и профиля кандидатов.

По последним данным, количество вакансий в IT-сфере растет на 20% ежегодно. Наиболее востребованные профессии включают программистов, аналитиков данных и специалистов по кибербезопасности. Средний уровень зарплат также демонстрирует устойчивый рост.

Факторы, влияющие на рынок:

Влияние пандемии COVID-19 и переход на удаленный формат кардинально изменили подход к работе. Удаленные команды стали нормой, что открыло новые возможности и увеличило конкуренцию среди кандидатов. Инновации и новые технологии (AI, Cloud, IoT).

**2. Технологии и архитектура программной системы**

Общие требования к системе:

- Функциональные требования: сбор данных, анализ, отчетность.
- Нефункциональные требования: безопасность, производительность, масштабируемость.

Разработка должна учитывать функциональные требования вроде сбора данных из различных источников, их обработки и представления в удобном виде для конечных пользователей. Нефункциональные тре-

бования связаны с обеспечением безопасности данных и высокой производительностью системы.

Архитектура системы:

- Модульная архитектура: клиентская часть, серверная часть, база данных.

- Выбор технологий: языки программирования (Python, Java), фреймворки (Django, Flask), базы данных (PostgreSQL, MongoDB).

Система будет построена на модульной архитектуре, где каждый модуль (сбор данных, анализ, интерфейс) будет развиваться независимо, что позволяет проще вносить изменения и добавлять новые функции. Мы выбрали использование Python с фреймворком Django и PostgreSQL для хранения данных.

Инструменты разработки:

- - Использование API для интеграции с платформами (LinkedIn, HeadHunter).

- Применение инструментов машинного обучения для анализа данных (Scikit-Learn, TensorFlow).

В системе будет реализован веб-скрейпинг для сбора информации о вакансиях и резюме, с использованием таких библиотек, как BeautifulSoup и Scrapy. Для анализа данных мы выберем инструменты машинного обучения, которые помогут выявлять тренды и производить прогнозы.

### **3. Модули системы**

Модуль сбора данных:

- Автоматизированный сбор вакансий и резюме с использованием веб-скрейпинга.

- Интеграция с внешними API для актуализации данных.

Модуль сбора данных. Мы планируем собрать данные как с популярных сайтов вакансий, так и из социальных сетей, таких как LinkedIn, используя API для интеграции и веб-скрейпинг для получения информации.

Аналитический модуль:

Использование методов анализа данных для выявления трендов и паттернов.

- Алгоритмы предсказательной аналитики для прогнозирования требований на рынке труда.

Система будет анализировать собранные данные, используя методы кластеризации для выделения наиболее популярных профессий и зарплатных диапазонов, а также предсказательные алгоритмы для прогнозирования изменений на рынке.

Интерфейс пользователя:

- Описание пользовательского интерфейса: удобный и интуитивно понятный.
- Примеры макетов и UX-дизайна для HR-менеджеров и соискателей.

Удобный интерфейс станет ключевым элементом, который позволит пользователям быстро и легко получать необходимую информацию. Предоставление графиков, сравнений и отчетов значительно упростит понимание данных.

#### **4. Практическое применение системы**

Кейсы использования:

- Примеры применения системы для HR-специалистов: поиск кандидатов, анализ рынка.
- Полезные инструменты для соискателей: подбор вакансий, анализ персональных требований.

HR-менеджеры смогут использовать систему для мониторинга рынка вакансий, выявления потребностей в кадрах и анализа конкурентоспособности оплаты труда. Кандидаты смогут изучать актуальные вакансии и соответствовать требованиям.

Успехи и ограничения:

- Преимущества системы: повышение эффективности поиска, точность данных.
- Возможные недостатки: проблемы с качеством данных, необходимость постоянного обновления.

Ожидается, что система повысит скорость и качество подбора кадров. Однако также могут возникать проблемы с качеством собранных данных, что требует постоянного обновления и проверки информации.

#### **5. Будущее рынка труда IT-специалистов**

Прогнозы и перспективы:

- Ожидаемые изменения на рынке труда в связи с новыми технологиями.
- Изменение требований к специалистам и карьерные пути.

Ожидается, что в будущем спрос на IT-специалистов продолжит расти, особенно в сферах искусственного интеллекта и анализа данных. Появление новых технологий будет требовать от специалистов постоянного обучения и адаптации.

Адаптация системы:

- Как система будет адаптироваться к изменениям: обновление алгоритмов, новые функции.

Наша система будет динамически обновляться, чтобы соответствовать новым требованиям. Мы планируем добавлять функции по мере изменения рынка и появления новых технологий.

**В 2025 году рынок труда IT-специалистов ожидается многогранным и конкурентоспособным.** Некоторые тренды и прогнозы:

- **Рост спроса на специалистов.** Разработчики, аналитики и инженеры станут всё более важными для бизнеса. Основные двигатели спроса — инновации и технологическая трансформация. 1

- **Проектная работа и фриланс.** Многие специалисты будут выбирать работу на нескольких клиентов одновременно, что позволит гибко располагать своим временем и получать доступ к новым проектам.

- **Кибербезопасность на первом плане.** С увеличением цифровых данных растёт и объём злонамеренных атак. Специалисты, знакомые с методами защиты информации и умеющие предотвращать атаки, будут в высоком спросе.

- **Диверсификация навыков.** Специалисты должны не только углубляться в свою область, но и развивать дополнительные навыки, такие как управление проектами, UX/UI-дизайн, маркетинг и софт-скилз.

- **Сближение бизнеса и технологий.** Интеграция бизнес-процессов с технологиями станет ключом к успеху. IT-специалисты, способные понимать потребности бизнеса и предлагать эффективные решения, будут востребованы.

- **Нормализация рынка труда.** Ожидается смена ажиотажного спроса на IT-услуги более взвешенным подходом, что приведёт к снижению «аукционов офферов» и большей предсказуемостью в зарплатных ожиданиях.

Среди востребованных специальностей отмечают специалистов в области машинного обучения, Big Data, нейросетей, кибербезопасности, 1С-разработчиков, а также маркетологов, юристов, менеджеров по продажам с крепким пониманием отрасли.

## Заключение

Выводы:

Создание программной системы по анализу рынка труда IT-специалистов является важной задачей, способствующей улучшению взаимодействия между работодателями и соискателями.

## Список литературы:

1. Филиппова И. Как в центре Yes выбрали сервис для удаленных уроков и открыли полноценную онлайн-школу [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://kontur.ru/talk/responses/1145> (дата обращения 13.03.2025).

2. Скрипниченко П. Контур.Толк поддержит бизнес, который столкнулся с отключением зарубежного ПО: [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://kontur.ru/talk/spravka/49121-otklyuchenie\\_zarubezhnogo\\_po](https://kontur.ru/talk/spravka/49121-otklyuchenie_zarubezhnogo_po) (дата обращения 13.03.2025).
3. Российский рынок разработки ПО растет на 15% в год от 02.04.2022г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://kontur.ru/talk/spravka/49121-otklyuchenie\\_zarubezhnogo\\_po](https://kontur.ru/talk/spravka/49121-otklyuchenie_zarubezhnogo_po) (дата обращения 13.03.2025).
4. Федеральный закон "Об информации, информационных технологиях и о защите информации" от 27.07.2006 N 149-ФЗ (последняя редакция).
5. Зараменских Е. П. Информационные системы в бизнесе: учебник и практикум для среднего профессионального образования. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во Юрайт, 2024. — 470 с.
6. Кравченко Т.К., Исаев Д.В. Системы поддержки принятия решений: учебник и практикум для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во Юрайт, 2024. — 327 с.
7. Моргунов А.Ф. Информационные технологии в менеджменте: учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во Юрайт, 2024. — 310 с.
8. Вакансии в отрасли «IT, интернет, связь, телеком» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: Сайт <http://rabota.yandex.ru>. (дата обращения 13.03.2025).
9. Интернет-ресурс по поиску работы и подбору персонала [Электронный ресурс]. — Режим доступа: Сайт <http://job.ru>. (дата обращения 13.03.2025).

### 1.3. МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

#### ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРЕБРА НА СТАДИИ ЦИАНИДНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ СУСПЕНЗИИ АВТОКЛАВИРОВАНИЯ

*Васильев Роман Евгеньевич*

*аспирант,*

*Санкт-Петербургский горный университет*

*императрицы Екатерины II,*

*РФ, г. Санкт-Петербург*

#### INCREASE OF SILVER RECOVERY AT THE CYANIDE LEACHING STAGE DUE TO ADDITIONAL CONDITIONING OF AUTOCLAVED SLURRY

*Roman Vasiliev*

*Postgraduate student,*

*Empress Catherine II*

*Saint Petersburg Mining University,*

*Russia, Saint-Petersburg*

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты лабораторных исследований по автоклавному окислительному выщелачиванию (АОВ) двух проб медных концентратов, содержащих серебро. Целью работы было повышение извлечения серебра на стадии цианидного выщелачивания за счет разрушения соединений, инкапсулирующих серебро, - аргентоярозитов, при помощи дополнительных этапов кондиционирования суспензии автоклавирования. Полученные результаты подтверждают эффективность применения данных операций.

**Abstract.** This paper presents the results of laboratory studies on autoclave oxidative leaching (POX) of two samples of copper concentrates containing silver. The objective of the work was to increase silver recovery at the cyanide leaching stage by destroying silver encapsulating compounds (argentojarosite) using additional autoclave slurry conditioning steps. The results obtained confirm the efficiency of these operations.

**Ключевые слова:** серебро, автоклавное окисление, ярозиты, цианидное выщелачивание, кондиционирование

**Keywords:** silver, autoclave oxidation, jarosite, cyanide leaching, conditioning

Актуальность работы обусловлена обострением проблемы переработки сырья с повышенным содержанием мышьяка [2]. Истощение легкодоступных месторождений приводит к необходимости вовлечения в производственный цикл бедных руд с высоким содержанием вредных примесей. Мышьяк, изначально присутствующий в минеральной составляющей сырья, имеет тенденцию к высвобождению в процессе последующей гидрометаллургической и пирометаллургической обработки, что создаёт риск его попадания в окружающую среду. [8]. В целях снижения негативного воздействия на окружающую среду необходимо применение таких технологических решений, которые обеспечивают трансформацию вредных примесей в устойчивые нетоксичные соединения. В современной промышленной практике наблюдается тенденция к существенному ужесточению экологических нормативов, регламентирующих качественный и количественный состав сырья, подлежащего технологической переработке [9].

Пирометаллургические методы переработки сырья применяются достаточно давно, хорошо изучены и широко распространены в мировой промышленности. Физико-химические процессы, протекающие при высоких температурах (от 800 °С до 3000 °С), обеспечивают высокую скорость протекания реакций, что в свою очередь позволяет достичь более высокой удельной производительности пирометаллургических аппаратов по сравнению с гидрометаллургическими процессами [1]. Однако постоянно повышающееся содержание вредных примесей в исходном сырье, например, мышьяка, может существенно усложнить процесс переработки, требуя внедрения дополнительных систем его удаления [4].

Автоклавное окисление относится к гидрометаллургическим методам и представляет собой перспективный способ переработки высокомышьяковистого медного серебросодержащего сырья [3]. Данная технология обладает рядом преимуществ, включая перевод вредных примесей в раствор, а затем осаждения в виде малорастворимых соединений. В частности, мышьяк может быть утилизирован в виде арсената железа – скородита [5]. Помимо этого, медь переходит в раствор автоклавирования с возможностью дальнейшего извлечения при помощи экстракции- электроэкстракции, а золото и серебро остаются в твердом остатке автоклавирования. Однако в процессе автоклавного

окисления сульфидного сырья образуется малорастворимое соединение, аргентоярозит, которое инкапсулирует серебро и препятствует его извлечению на конечной стадии цианидного выщелачивания. Помимо аргентоярозита имеет место образование основного сульфата железа, который повышает расход оксида кальция и цианида натрия на последующих этапах нейтрализации-цианидного выщелачивания.

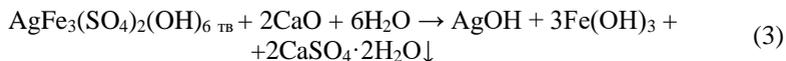
Образование аргентоярозита и основного сульфата железа протекает по следующим реакциям (реакция 1 и 2) [6]:



Для преодоления данной технологической проблемы представляется целесообразным внедрение дополнительных операций кондиционирования, включающих горячее кондиционирование и кипячение с известью [7].

Основная суть горячего кондиционирования состоит в том, что реакция образования основного сульфата железа при высоких температурах автоклавного выщелачивания обратима при снижении температуры процесса. В этой связи, после проведения окисления в автоклаве полученная суспензия охлаждается до 98 °С и выдерживается в течение 2-6 часов. В результате, в раствор переходит большая часть железа и мышьяка. После разделения жидкой и твердой фракций, раствор отправляется на осаждение железа и мышьяка, и затем на выделение меди. Твердый остаток отправляется на операцию кипячения с известью [10].

Смысл данной операции заключается в кипячении дисперсного твердого остатка с добавлением извести в течение определённого времени (2 ч). В результате происходит разрушение аргентоярозита и перевод серебра в форму, доступную для извлечения цианидным выщелачиванием (уравнение 3):



Были проведены серии экспериментов по автоклавному окислительному выщелачиванию двух проб концентратов, имеющих следующий состав:

Таблица 1.

## Химический состав медных концентратов

Содержание Проба	S <sub>сульф</sub>	As	Fe	Cu	Ag
	%	%	%	%	г/т
Концентрат - 1	20,8	1,19	12,3	25,4	164
Концентрат - 2	26,2	1,71	20,1	23,0	277

Исходные пробы концентратов подвергались измельчению до требуемой фракции в шаровой мельнице, после чего осуществлялось автоклавное окислительное выщелачивание в титановом автоклаве при температуре 220 °С и парциальном давлении кислорода 0,7 МПа продолжительностью 1 час. Последующий этап включал проведение операции горячего кондиционирования в том же автоклаве со снижением температуры процесса до 98 °С в течение 6 часов. Разделение жидкой и твердой фаз производилось методом фильтрации на вакуум-фильтре. Полученный твердый осадок подвергался кипячению с добавлением извести в стеклянной емкости при температуре 95 °С и pH более 11 в течение 2 часов. Далее с осадком суспензии после фильтрации проводили цианидное выщелачивание в течение 24 часов при начальной концентрации NaCN 3 г/л. Все полученные растворы и твердые остатки были подвергнуты комплексному анализу на содержание меди, серебра, железа и мышьяка.

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Применение автоклавного выщелачивания для данного типа сырья позволяет практически полностью окислить все сульфидные минералы. Требуемые показатели достигаются при температуре автоклавирования 220 °С в течение 1 часа. Извлечение меди в раствор и степень удаления сульфидной серы составляют более 99 %. В то же время, большее количество мышьяка и железа также переходит в раствор, после чего может быть осаждено путем добавления карбоната кальция.

2. Операция горячего кондиционирования позволяет уменьшить выход твердого продукта после фильтрования суспензии автоклавирования, а также существенно снизить расход оксида кальция и цианида натрия на последующих этапах переработки. Процесс рекомендуется проводить при температуре 98 °С в интервале от 2 до 6 часов;

3. Операция кипячения с известью совместно с горячим кондиционированием позволяет увеличить извлечение серебра при цианировании в несколько раз, вплоть до 95% (степень извлечения без дополнительных операций кондиционирования составляла менее 8% для

каждого концентрата). Процесс рекомендуется проводить при температуре 95 °С в течение 2 часов;

### Список литературы:

1. Богатырев Д. М., Петров Г. В., Цымбулов Л. Б. Пирометаллургические технологии переработки сульфидных медно-никелевых руд с высоким содержанием металлов платиновой группы: современное состояние и перспективы развития //Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. – 2022. – Т. 20. – №. 1. – С. 14-24. DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-14-24
2. Бодуэн А. Я., Петров Г. В., Кобылянский А. А., Булаев А. Г. Сульфидное выщелачивание медного концентрата с высоким содержанием мышьяка // Обогащение руд. – 2022. – № 1. – С. 14-19. DOI: 10.17580/or.2022.01.03
3. Зайцев П.В., Кравченко Н.А. Гидрометаллургическое извлечение меди и серебра из концентратов флотации смешанной руды // Цветные металлы. – 2020. – №. 9. – С. – 84-91. DOI: 10.17580/tsm.2020.09.07
4. Селиванов Е. Н., Новиков Д. О., Беляев В. В., Скопов Г. В. Распределение мышьяка по продуктам пирометаллургической переработки медно-цинкового концентрата // Цветные металлы. – 2020. – №. – 1. – С. 14-18. DOI: 10.17580/tsm.2020.01.02
5. Черемисина О. В., Васильев Р. Е., Нетрусов А. О., Тер-Оганесянц А. К. Влияние процессов горячего кондиционирования и кипячения с известью продукта автоклавной переработки высокомышьяковистого медного сырья на показатели извлечения драгоценных металлов при последующем цианировании // Цветные металлы – 2024 – №2. – С. 19-26. DOI: 10.17580/tsm.2024.02.02
6. Шнеерсон, Я.М. Автоклавные процессы переработки медьсодержащего сырья. Я.М. Шнеерсон, Зайцев П.В. // Цветные металлы. – 2016. – № 1. – С. 26–31. DOI: 10.17580/tsm.2016.01.04
7. Fleming C. A. Basic iron sulfate – a potential killer in the processing of refractory gold concentrates by pressure oxidation // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2010. – Vol. 27. – № 2. – P 81–88. DOI: 10.1007/BF03402383
8. Padilla R., Rodríguez G., Ruiz M.C. Copper and arsenic dissolution from chalcopyrite-enargite concentrate by sulfidation and pressure leaching in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> // Hydrometallurgy. – 2010. – Vol. 100. – № 3-4. – P. 152-156. DOI: 10.1016/j.hydromet.2009.11.006
9. Ruiz M. C., Bello R. P.R. Removal of arsenic from enargite rich copper concentrates // Materials Processing Fundamental. – 2013. – P. 249-256. DOI: 10.1007/978-3-319-48197-5\_28
10. Shoppert A. A., Karimova L. M., Zakharyan D. V. Novel method for comprehensive processing of low-grade copper concentrate // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 856–862. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.856

## АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 65Г

**Косанова Индира Муратовна**

докторант PhD кафедры стандартизации,  
метрологии и сертификации  
НАО Казахский агротехнический университет  
им. С.Сейфуллина,  
Казахстан, г. Нур-Султан

**Аннотация.** В данной статье представлен способ выбора оптимальных режимов плазменной обработки стали 65Г, таких как глубина и ширина зоны закалки, скорость движения, определяющая производительность процесса, погонная энергия и скорость охлаждения в зоне закалки. Приведен анализ изменения параметров закалки в зависимости от диаметра плазмообразующего сопла, что может привести к уменьшению или увеличению глубины и ширины зоны закалки, скорости движения и погонной энергии, что соответственно может образовать накопление дефектов структуры и зарождение очага разрушения.

**Abstract.** This article presents a method for selecting the optimal modes of plasma treatment of the surface of steel 65G, such as the depth and width of the hardening zone, the speed of movement, which determines the productivity of the process, the heat input and the cooling rate in the hardening zone. An analysis is given of the change in the hardening parameters depending on the diameter of the plasma-forming nozzle, which can lead to a decrease or increase in the depth and width of the hardening zone, the speed of movement and heat input, which, accordingly, can form the accumulation of structural defects and the nucleation of a fracture site.

**Ключевые слова:** плазменная обработка, износостойкость, плазмообразующее сопло, глубина и ширина зоны закалки, градиентное нанесение.

**Keywords:** plasma treatment, wear resistance, plasma-forming nozzle, depth and width of the hardening zone, gradient application.

Общеизвестно, что в настоящее время до 90 % машин и механизмов выходят из строя не из-за поломок деталей, а вследствие изнашивания их рабочих поверхностей, поэтому основным требованием к структуре и свойствам поверхностного слоя деталей и изделий является хорошая износостойкость.

При объемном нагружении процессы пластической деформации локализуются в определенной части объема материала, где и происходит накопление дефектов структуры, концентрация напряжений и зарождение очага разрушения, в то время как процессы пластической деформации и разрушения поверхностных слоев отличаются в первую очередь сложным распределением напряжений по всей зоне контакта.

Расчет максимальных размеров зоны закалки

Глубина и ширина зоны закалки должны определяться с учетом двух факторов (рис. 1):

- температура нагрева в каждой точке зоны закалки должна быть равной или больше критической для данного материала  $T \geq T_{\text{зак}}$ ;
- скорость охлаждения в каждой точке хвостовой части изотермы  $T_{\text{зак}}$  должна быть не меньше критической скорости охлаждения для данной стали (как видно на рис. 4.4, поскольку  $c_2 > c_1$ , то имеем скорость охлаждения  $v_{\text{охл}2} < v_{\text{охл}1}$ , а значит, если в точке 1 скорость охлаждения  $v_{\text{охл}}$  не меньше критической  $v_{\text{кр}}$  (например, для стали 65Г  $v_{\text{охл}} = v_{\text{кр}} = 100 \text{ K/c}$ ), то глубина этой точки будет соответствовать максимальной глубине закалки  $h_{\text{зак.макс}}$ ):

$$v_{\text{охл}} = dT/dt = (T - T_{\text{зак}}) \cdot v/c.$$

Аналогично рассчитывается максимальная ширина закалки  $b_{\text{зак.макс}}$ .

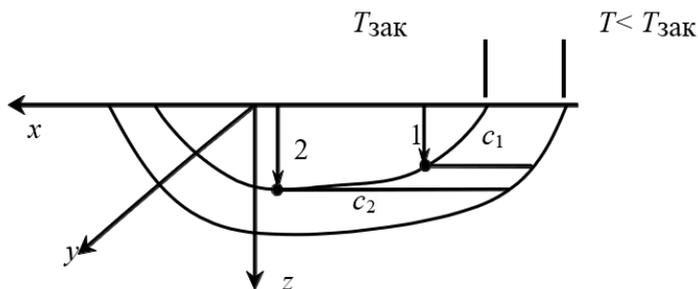
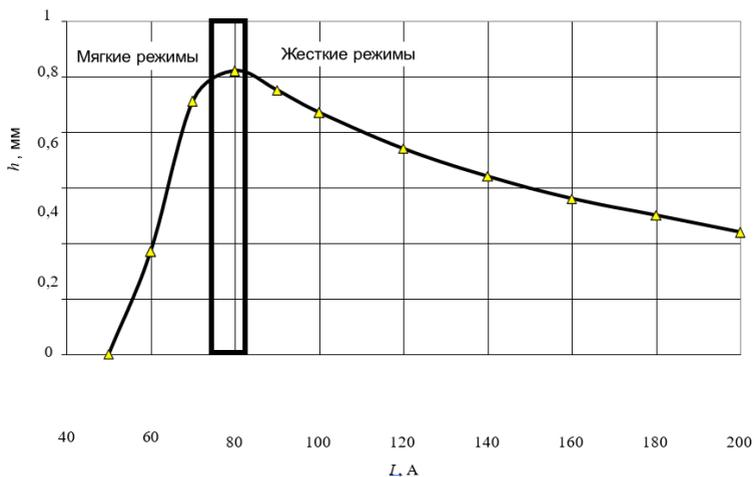


Рисунок 1. Схема расчета максимальной глубины закалки, где  $T \rightarrow T_{\text{зак}}$ .

### Выбор оптимальных режимов плазменной закалки

С целью предупреждения роста зерна, окисления или подплавления закаливаемой поверхности необходимо при расчете режима закалки ограничивать максимальную температуру поверхности металла [1, с. 217].

Рисунок 2 иллюстрирует влияние тока сжатой дуги и диаметра плазмообразующего сопла на перечисленные выше параметры.



**Рисунок 2. Зависимость глубины зоны закалки от тока сжатой дуги ( $d_{сч} = 3 мм$ ;  $s = 20 мм$ )**

Можно выделить две области возможных режимов плазменной закалки, условно названных «Мягкие режимы» и «Жесткие режимы». В области мягких режимов, характерных для относительно малых токов сжатой дуги и небольших скоростей движения, размеры зоны закалки лимитирует скорость охлаждения металла; температура поверхности закаливаемого металла ниже задаваемой допустимой температуры (естественно, меньшей температуры плавления для исключения последующих операций шлифовки закаленных поверхностей).

В области жестких режимов, характерных для повышенных токов сжатой дуги и больших скоростей движения, размеры зоны закалки лимитируются температурой поверхности закаливаемого металла, которая не должна превышать заданную допустимую температуру. Скорости охлаждения металла в зоне закалки при этом выше критической скорости охлаждения, необходимой для данного материала.

К числу *входных параметров* технологической системы относятся параметры плазменной обработки, движения детали или плазматрона, параметры обрабатываемого материала (рис. 1).

Параметры плазменной обработки являются переменными. Благодаря им можно значительно варьировать характеристики технологи-

ческого процесса. Параметры плазменной обработки включают в себя характеристики подводимого к плазматрону тока, плазмообразующего газа и водяного охлаждения.

Сила тока  $I$  определяет эффективную тепловую мощность плазменной струи  $q$ :

$$q = 0,24 \eta_{\text{п.н}} I U, \quad (7)$$

где  $\eta_{\text{п.н}}$  КПД плазменного нагрева,  $\eta_{\text{п.н}} - \eta_{\text{п}} \eta_{\text{с}}$ ,  $\eta_{\text{п}}$  – КПД плазматрона,  $\eta_{\text{с}}$  – КПД плазменной струи с учетом потерь на излучение и отражение,  $U$  – напряжение на дуге.

Расход плазмообразующего газа должен обеспечивать стабильное плазмообразование, а также стабилизацию дуги в канале плазматрона.

От марки плазмообразующего газа зависит температура плазмы. Инертные газы обеспечивают защиту внутреннего канала плазматрона от окисления, а обрабатываемой поверхности – от окисления и выгорания легирующих элементов. Увеличение силы тока и расхода плазмообразующего газа ведет к увеличению твердости и глубины упрочненного слоя. Это объясняется тем, что тепловая мощность плазменной струи меняется пропорционально току, а при увеличении расхода газа происходит дополнительное обжатие струи, вызывающее рост температуры плазмы [2, с. 51].

К числу *выходных параметров* процесса плазменной обработки относятся:

- твердость упрочненного слоя;
- геометрические параметры упрочненной зоны (глубина и ширина);
- качество упрочненной поверхности (шероховатость и волнистость);
- остаточные напряжения в упрочненном слое;
- градиентное строение упрочненной поверхности, обеспечиваемое чередованием упрочненных и неупрочненных участков (табл. 1).

Таблица 1.

### Выходные параметры технологической системы плазменного упрочнения

Наименование группы параметров	Параметры
Параметры упрочненной зоны	Твердость
	Глубина
	Ширина
	Шероховатость
Параметры упрочненной поверхности	Остаточные напряжения Градиент

Для выбора оптимальной технологии плазменного поверхностного упрочнения проводили исследования образцов из высокоуглеродистой стали на износостойкость при различных режимах и вариантах нанесения зон закалки (без зазора между зонами и с зазором – градиентного упрочнения). Была достигнута твердость 50...55 HRC, размеры упрочненной зоны: ширина 10..12 мм и глубина 1,0 ...1,2 мм. Упрочнение выполняли по трем схемам: упрочнение без зазора, упрочнение с зазором, равным половине ширины зоны упрочнения вдоль направляющих и с таким же зазором под углом 45° к направлению продольной подачи. Установку расстояния от среза сопла плазматрона до упрочняемой поверхности и выбор угла наклона при упрочнении наклонных поверхностей осуществляли вручную [3, с. 24].

Результаты испытаний стойкости направляющих после поверхностного упрочнения показали, что градиентное плазменное поверхностное упрочнение позволяет увеличить износостойкость направляющих в 2,5...2,9 раз и тем самым увеличить межремонтный интервал. При этом градиентное нанесение упрочненных зон позволяет получить благоприятное расположение полей остаточных напряжений. Образовавшиеся в процессе приработки впадины на неупрочненных участках служат в качестве масляных карманов, что, в свою очередь, улучшает условия работы обрабатываемой детали [4, с. 194].

### Выводы

1. Определено, что основными регулируемыми параметрами процесса плазменного поверхностного упрочнения являются максимальная температура нагрева поверхностного слоя  $T_{\text{наг}}$  и скорость охлаждения поверхностного слоя  $v_{\text{охл}}$ . При этом эти параметры  $T_{\text{наг}}$  и  $v_{\text{охл}}$  не являются параметрами прямого регулирования при разработке техно-

логии плазменного упрочнения, а являются комплексными параметрами, на значения которых влияют большое число факторов.

2. Для создания интегрированных технологических процессов упрочнения деталей рекомендуется системный подход к анализу влияния входных и выходных параметров процесса плазменной поверхностной обработки с нанесением упрочненного слоя градиентного строения на характеристики упрочненных изделий.

3. К числу входных параметров технологической системы отнесены параметры плазменной обработки, движения детали или плазматрона, параметры обрабатываемого материала. К выходным параметрам поверхностной плазменной обработки отнесены: твердость упрочненного слоя, геометрические параметры упрочненной зоны (глубина и ширина), качество упрочненной поверхности (шероховатость и волнистость), остаточные напряжения в упрочненном слое и градиентное строение упрочненной поверхности, обеспечиваемое чередованием упрочненных и неупрочненных участков.

### **Список литературы:**

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Санкт-Петербург, Издательство политехнического университета, 2013, с.217-230
2. Коротков В.А., Макаров С.В. Установка для ручной поверхностной закалки плазменной струей. Журнал "Металлообработка", 2009, № 5, с.43-46
3. Ефименко В.Г. и др. Влияние объемной и поверхностно-плазменной термической обработки на микроструктуру и износостойкость колесной стали. Журнал "Трение и износ", 2017, № 1, с.24-29
4. Смирнов И., Белкин П., Эпельфельд А. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Мир материалов и технологий, 2011, с.194-211.

## 1.4. РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

### **ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ МЕТАМАТЕРИАЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ НА РАСШИРЕНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ И УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РУПОРНОЙ АНТЕННЫ: ПРОБЛЕМНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

*Магомедкеримов Руслан Гераклиевич*

*курсант,*

*Военная академия*

*воздушно-космической обороны им. Г.К. Жукова*

*РФ, г. Тверь*

*Лобов Матвей Васильевич*

*курсант,*

*Военная академия*

*воздушно-космической обороны им. Г.К. Жукова*

*РФ, г. Тверь*

### **THE INFLUENCE OF THE TOPOLOGY OF A METAMATERIAL DIELECTRIC LENS ON THE EXPANSION OF BANDWIDTH AND IMPROVEMENT OF THE CHARACTERISTICS OF A HORN ANTENNA: A PROBLEM-THEORETICAL ANALYSIS**

*Ruslan Magomedkerimov*

*Cadet,*

*Military Academy*

*G.K. Zhukov Aerospace Defense,*

*Russia, Tver*

*Matvey Lobov*

*Cadet,*

*Military Academy*

*G.K. Zhukov Aerospace Defense,*

*Russia, Tver*

**Аннотация.** В данной статье представлено проблемно-теоретическое исследование влияния топологии метаматериальной диэлектрической линзы, расположенной на раскрытии рупорной антенны, на расширение полосы пропускания и улучшение характеристик, в частности коэффициента усиления и диаграммы направленности. В отличие от традиционных диэлектрических линз, использование метаматериалов позволяет создать линзы с отрицательным показателем преломления, что открывает новые возможности для фокусировки электромагнитных волн и коррекции аберраций. Проведено численное моделирование в среде HFSS для различных топологий метаматериальных линз, включая решетки из кольцевых резонаторов (SRR) и проволочных структур. Представлены результаты анализа S-параметров, диаграммы направленности, коэффициента усиления и согласования антенны в широком диапазоне частот. Показано, что предложенная топология метаматериальной линзы позволяет существенно расширить полосу пропускания рупорной антенны, одновременно улучшая её коэффициент усиления и формируя желаемую диаграмму направленности. Данный подход открывает перспективы для создания высокопроизводительных антенных систем для перспективных применений в телекоммуникациях и радиолокации. Такие улучшенные антенны критически важны для следующего поколения беспроводных коммуникаций, требующих более высокой скорости передачи данных и надежности связи, а также в современных радиолокационных системах, нуждающихся в высокой разрешающей способности и дальности обнаружения.

**Abstract.** This article presents a problem-theoretical study of the effect of the topology of a metamaterial dielectric lens located on the opening of a horn antenna on bandwidth expansion and improved performance, in particular gain and radiation pattern. Unlike traditional dielectric lenses, the use of metamaterials makes it possible to create lenses with a negative refractive index, which opens up new possibilities for focusing electromagnetic waves and correcting aberrations. Numerical simulation has been performed in the HFSS environment for various topologies of metamaterial lenses, including gratings made of ring resonators (SRRs) and wire structures. The results of the analysis of S-parameters, radiation patterns, antenna gain and matching in a wide frequency range are presented. It is shown that the proposed topology of the metamaterial lens makes it possible to significantly expand the bandwidth of the horn antenna, while simultaneously improving its gain and forming the desired radiation pattern. This approach opens up prospects for the creation of high-performance antenna systems for promising applications in telecommunications and radar. Such improved

antennas are critically important for the next generation of wireless communications requiring higher data transfer rates and reliable communications, as well as in modern radar systems requiring high resolution and detection range.

**Ключевые слова:** рупорная антенна, метаматериалы, диэлектрическая линза, решетка из кольцевых резонаторов (SRR), отрицательный показатель преломления, полоса пропускания, коэффициент усиления, диаграмма направленности, численное моделирование, HFSS.

**Keywords:** horn antenna, metamaterials, dielectric lens, ring resonator array (SRR), negative refractive index, bandwidth, gain, radiation pattern, numerical simulation, HFSS.

Современные беспроводные системы связи требуют антенн, способных работать в широком диапазоне частот с высокими характеристиками, включая высокий коэффициент усиления и хорошо контролируемую диаграмму направленности. Рупорные антенны, благодаря своей простоте и надежности, являются привлекательным решением, однако их полоса пропускания и коэффициент усиления ограничены. Использование диэлектрических линз традиционно применялось для улучшения характеристик рупорных антенн, но возможности их оптимизации ограничены свойствами доступных диэлектрических материалов.

Революционный прорыв в области материаловедения, связанный с созданием метаматериалов, открывает принципиально новые возможности для управления электромагнитными волнами.

Метаматериалы – это искусственно созданные структуры, обладающие электромагнитными свойствами, не встречающимися в природе, включая отрицательный показатель преломления.

Использование метаматериальных линз для рупорных антенн позволяет преодолеть ограничения, присущие традиционным диэлектрическим линзам, и достичь существенного расширения полосы пропускания и улучшения характеристик антенны [1; 10].

В данной статье представлено проблемно-теоретическое исследование влияния топологии метаматериальной диэлектрической линзы на характеристики рупорной антенны. В отличие от предыдущих работ, фокусировавшихся на узкополосных приложениях [2; 4], авторы данной статьи предлагают и анализируют топологию метаматериальной линзы, обеспечивающую расширение полосы пропускания и улучшение характеристик рупорной антенны одновременно. Предложенная конструкция основана на решетке из кольцевых резонаторов (SRR), обладающих резонансными свойствами в СВЧ диапазоне.

Метаматериалы представляют собой искусственно созданные структуры, период которых значительно меньше длины волны падающего электромагнитного излучения. Это позволяет рассматривать метаматериал как однородную среду с эффективными электромагнитными параметрами: диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon$ ) и магнитной проницаемостью ( $\mu$ ). Резонансные элементы, такие как SRR, позволяют создавать метаматериалы с отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  вблизи резонансной частоты. Отрицательный показатель преломления ( $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ ) позволяет фокусировать электромагнитные волны нетрадиционными способами, что открывает новые возможности для создания линз с улучшенными характеристиками.

Для численного моделирования рупорной антенны с метаматериальной линзой использовалась программа HFSS (High Frequency Structure Simulator), основанная на методе конечных элементов. Размеры рупорной антенны были выбраны следующими: ширина раскрытия  $a = 50$  мм, высота раскрытия  $b = 40$  мм, длина рупора  $L = 80$  мм. Метаматериальная линза располагалась на расстоянии  $d = 10$  мм от раскрытия рупора.

Топология метаматериальной линзы представляла собой периодическую решетку из SRR, расположенных на диэлектрической подложке из Rogers RO4350B ( $\epsilon_r = 3.66$ ,  $\text{tg}\delta = 0.0037$ ). Размеры SRR: внешний радиус  $r_{out} = 2$  мм, внутренний радиус  $r_{in} = 1$  мм, ширина щели  $g = 0.2$  мм, период решетки  $p = 5$  мм. Подложка имела толщину  $h = 0.8$  мм.

В качестве граничных условий использовались Radiation Boundary Conditions. Размер ячейки сетки был выбран  $\lambda/20$  на самой высокой частоте моделирования (12 ГГц). Частотный диапазон моделирования составлял 8–12 ГГц с шагом 0.1 ГГц.

Численное моделирование S11 параметра показало, что использование метаматериальной линзы улучшает согласование антенны в диапазоне 9–11 ГГц, что свидетельствует о расширении полосы пропускания. Значение S11 в этом диапазоне ниже -10 дБ.

Анализ диаграммы направленности на частоте 10 ГГц выявил, что использование метаматериальной линзы приводит к сужению главного лепестка и увеличению коэффициента усиления.

Исследование зависимости коэффициента усиления от частоты показало, что метаматериальная линза обеспечивает увеличение коэффициента усиления во всем диапазоне частот, при этом максимальное увеличение наблюдается на частоте 10 ГГц.

Результаты численного моделирования подтвердили гипотезу о том, что использование метаматериальной линзы позволяет суще-

ственно расширить полосу пропускания и улучшить характеристики рупорной антенны. Предложенная топология метаматериальной линзы, основанная на решетке из SRR, обеспечивает отрицательный показатель преломления в диапазоне 9–11 ГГц, что приводит к улучшению согласования антенны и фокусировке электромагнитной энергии.

По сравнению с традиционными диэлектрическими линзами, метаматериальные линзы обладают большей гибкостью в управлении электромагнитными свойствами, что позволяет создавать антенны с улучшенными характеристиками.

Однако, необходимо учитывать потери в метаматериалах, которые могут снижать эффективность антенны.

В дальнейшем планируется провести оптимизацию топологии метаматериальной линзы.

В отличие от предыдущих работ, предлагающих метаматериальные линзы для узкополосных приложений, в данной статье впервые представлена топология метаматериальной линзы на основе SRR, обеспечивающая *одновременное* расширение полосы пропускания и улучшение коэффициента усиления рупорной антенны. Это является *значительным улучшением* по сравнению с предыдущими работами и перспективным подходом к созданию высокопроизводительных антенных систем.

### Список литературы:

1. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // *Успехи физических наук*. – 1968. – Т. 10. – № 4. – С. 509.
2. Лупу А., Дубровина Н., Гасеми Р., Дежирон А., Люстрак А. Де Улучшенная направленность bow-tie антенн с метаматериальными линзами // *Прикладная физика*. – 2011. – Т. 98. – № 2. – С. 023104.
3. Alaei R., M. Albooyeh, M. Rahimzadeh Kalaleh, A. De Lustrac, H. J. Lezec, and J. A. Dionne, “Boosting the directivity of nanoantennas with non-radiating modes // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – No.1. – Pp. 1–8.
4. Bilotti F., Enoch S., Guerrini L., Vivaldi F. Equivalent-circuit model for the analysis of metallic split-ring resonators // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2008. – Vol. 56. – No 3. – Pp. 727–734.
5. Caloz C., Itoh T. *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 572 p.
6. Chen H.T., Taylor A.J., Padilla W.J. Metamaterial devices for terahertz radiation control // *Advanced Materials*. – 2008. – Vol. 20. – No. 15. – Pp. 2682-2696.

7. Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W. J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1999. – Vol. 47. – No. 11. – Pp. 2075-2084.
8. Pfeiffer C., Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets // *Physical Review X*. – 2013. – Vol. 3. – No. 4. – Pp. 041011.
9. Simovski C.R. Material parameters of metamaterials // *Metamaterials*. – 2011. – Vol. 5. – No.1. – Pp. 1–22.
10. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // *Physical Review Letters*. – 2000. – Vol. 84. – No.18. – Pp. 4184.

## 1.5. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМАНА В ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КАК ЭКОЛОГИЧНОГО И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО МАТЕРИАЛА

*Бурков Илья Викторович*

*магистрант,*

*Сургутский государственный университет,*

*РФ, г. Сургут*

**Аннотация.** В данной статье рассматриваются возможности использования такого материала как саман в качестве экологически чистой и доступной альтернативы для жилищного строительства. Делается обзор основных характеристик самана и проводится краткий сравнительный анализ его свойств с другими пористыми композитами. А также выделяются ключевые преимущества этого материала на органической основе и намечаются некоторые перспективы его использования в области архитектуры и строительства.

**Ключевые слова:** саман, экономия энергоресурсов, строительство, вторичная переработка, глина, малоэтажное строительство, экология.

В современном мире актуальной задачей до сих пор остается решение проблем экологического характера, так как ежедневно человек расточительно расходует ресурсы, что способствует загрязнению планеты. Одним из таких примеров является расход на энергоресурсы, приводящий к уменьшению на Земле запасов полезных ископаемых. На энергопотреблении сосредоточены многие отрасли производства, в том числе и строительство. Для частичного решения данной проблемы в области современной архитектуры рассматривается использование такого материала как саман.

Саман - это композитный материал, состоящий из земли, воды, соломы, глины и песка, обладающий высокой пластичностью, что позволяет укладывать его вручную при возведении здания. Также благодаря этому свойству из самана можно создать любую форму для постройки, часто этот материал применяется именно для создания

изогнутых стен, арок и сводов. Само слово саман происходит от староанглийского корня, означающего «ком или скругленная масса». Этот термин относится как к материалу, так и к домам, построенным из него, а также традиционной методике строительства, используемой веками в Европе в достаточно дождливом и холодном климате, вплоть до Аляски.

Особо следует отметить большой и продолжительный опыт строительства из глины в Германии. Так, в городе Вейльбург на Лоне в 1836 году было построено 36 двухэтажных зданий, трехэтажный фабричный корпус и одно здание на косогоре, имеющее с одной стороны пять этажей. После первой мировой войны в Германии возникла проблема быстрого восстановления городов и селений. Обобщение уже имевшегося опыта строительства из самана, положительные результаты продолжительной эксплуатации ранее построенных зданий позволили принять решение о восстановлении зданий путем саманного строительства. Для Германии 1919 год называют годом возрождения строительства из самана. В данный период из этого материала возведено очень большое количество одно- и двухэтажных зданий различного назначения [8].

Саман обладает рядом преимуществ, в числе которых можно выделить его гигроскопичность, благодаря которой материал хорошо впитывает влагу в сезон дождей, а в жаркую и сухую погоду отдает ее обратно. В результате этих процессов в доме из самана всегда поддерживается комфортный микроклимат помещений, что способствует экономии на энергоресурсах, так как пропадает необходимость в использовании кондиционеров и обогревателей [1].

Еще одним немаловажным свойством материала является его низкая теплопроводность, характеристики которой напрямую зависят от содержания легких наполнителей и состава смеси. Тяжелый саман обладает плотностью порядка 1500 - 1800 кг/м<sup>3</sup>, то есть она практически совпадает с плотностью строительного кирпича, а коэффициент теплопроводности вдвое ниже, чем у строительного кирпича – около 0,1 - 0,4 Вт/м °С – это показывает, что саман примерно вдвое теплее кирпича [3].

Также к положительным качествам самана можно отнести его звукоизоляционные свойства, которые зависят от характеристик материала и соблюдения всех технологических норм по снижению уровня шума в помещениях. У самана достаточно высокие показатели звукоизоляции и звукопоглощения, которые достигаются за счёт пористой структуры материала. Поэтому он хорошо справляется с изолированием помещений от внешних звуков, к тому же саман имеет высокую плотность, которая также понижает шумовой фон. В целом, материал

представляет собой достаточно прочный и надежный изолирующий экран, который в большинстве случаев позволяет эффективно решать проблемы со звукоизоляцией в помещениях различного назначения [2].

Затраты на строительство из самана минимальны, так как материал состоит главным образом из доступных природных компонентов. Глина, входящая в основу изготовления самана, является распространенным местным сырьем, запасы которого практически неисчерпаемы. Если в прошлом на глину для производства самана накладывали определенные ограничения (по жирности, пластичности и др.) в связи с ручным способом изготовления самана, то в настоящее время применение современных технологий позволило снять эти ограничения. При этом исследованиями установлено, что чем жирнее глина, тем качество самана по физико-механическим свойствам выше, особенно по прочности и водостойкости [7].

Также можно сопоставить некоторые характеристики самана с другими пористыми композитами, к которым, в частности, относится газобетон. Основным преимуществом материала является гибкость использования при проектировании и монтаже. Саман поддается формованию и ему можно придать необходимую форму, а для установки не требуется специального оборудования. Следующее преимущество самана заключается в том, что он обладает высоким уровнем паропроницаемости, а также благодаря волокнистой структуре выполняет функцию теплоизоляции, что позволяет существенно сэкономить на отоплении. Кроме того, необходимо отметить, что саман намного легче газобетона, поэтому монтаж и установка блоков при строительстве производятся в более сжатые сроки. Это делает материал привлекательным для тех заказчиков, которые рассматривают быстрый и сравнительно недорогой способ возведения жилья.

Таким образом, саман можно отнести к довольно перспективным материалам для малоэтажного бюджетного строительства, в том числе благодаря его экологическим качествам. На данный момент строительство является одной из ключевых отраслей производства, способных снизить уровень негативного влияния на природу путем разработки экологически чистых материалов с минимальным содержанием различных вредных веществ. Основная проблема касается широко применяемых сегодня современных материалов, которые за счет своей структуры не всегда подлежат вторичной переработке или разложению после утилизации, либо отличаются высокой энергоемкостью процессов изготовления. В то же время использование самана в строительстве способствует улучшению экологической ситуации, так как в состав материала входят натуральные компоненты, а его производство

обходится без химических примесей и дополнительного оборудования. Также следует отметить, что при необходимости саман может послужить для вторичной переработки и дальнейшего использования в качестве сырья для изготовления новых строительных изделий.

### Список литературы:

1. Глина – универсальный природный материал для строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://svetich.info/publikacii/selskii-stroitel/glina-universalnyi-prirodnyi-material-dl.html> / (дата обращения: 14.02.2023).
2. Мейснер А.Ф. Экономичные постройки из самана. – М.: Изд-во Мосobl-исполкома. – 52 с.
3. Мирман М., Макдоналд С. Дома из соломы // ISAR и Институт Солнечной Энергии. – Колорадо, США, 1997. – 80 с.
4. Саман, что это за материал, его свойства и применение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geostart.ru/post/19686> (дата обращения: 14.02.2023).
5. Саманный дом – экологичное и доступное жилье из подручных материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rmnt.ru/story/house/samannyu-dom-ekologichnoe-idostupnoe-zhile-iz-područnyx-materialov.441695> (дата обращения: 12.02.2023).
6. Саманный дом: виды, плюсы и минусы технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geostart.ru/post/19686> / (дата обращения: 12.02.2023).
7. Строительство из глины в Германии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nestor.minsk.by/sn/1997/28/sn2818.htm> (дата обращения: 12.02.2023)
8. Файст В. Основные положения по проектированию пассивных домов / пер. с нем. с доп. под ред. А.Е. Елохова. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 144 с.

## 1.6. ТРАНСПОРТ

### МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ В КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОСЦЕПНЫХ УСТРОЙСТВ

**Баубек Нұркелді Нұрбекұлы**

студент,  
Университет им. С. Башиева,  
Казахстан, г. Актөбе

**Шопанова Гүлжан Ережеповна**

научный руководитель,  
ассистент профессора,  
Университет им. С. Башиева,  
Казахстан, г. Актөбе

Несмотря на прочность и надежность конструкции, автосцепное устройство вагонов подвержено различным неисправностям, возникающим в процессе эксплуатации. Постоянные динамические нагрузки, механический износ, неблагоприятные погодные условия и ошибки при эксплуатации могут приводить к сбоям в работе сцепного механизма. Нарушение нормального функционирования автосцепки способно вызвать задержки в движении поездов, увеличение нагрузки на другие элементы подвижного состава и, в худших случаях, аварийные ситуации.

Неисправности автосцепного устройства можно разделить на несколько основных видов. Они включают механические повреждения корпуса и замковых механизмов, износ и поломку поглощающего аппарата, заедание сцепных узлов, а также нарушение фиксации сцепки в рабочем положении. Каждый из этих видов неисправностей требует своевременного выявления и устранения, поскольку даже незначительные отклонения в работе автосцепки могут привести к серьезным последствиям. Рассмотрим подробнее основные виды неисправностей, их причины и способы устранения.

Согласно данным, представленным на «Информационном сайте о железнодорожных вагонах: конструкция, устройство, расчет» [1], наиболее частыми причинами отказов автосцепок являются износ деталей, деформация и разрушение элементов, нарушение технологии изготовления и ремонта, а также воздействие климатических условий. Продолжительная эксплуатация приводит к истиранию ключевых эле-

ментов, таких как замкодержатель и тяговый хомут, что может ослабить сцепку и привести к саморасцепам. Высокие динамические нагрузки, возникающие при трогании поезда, торможении и маневрах, приводят к появлению трещин и разрушению отдельных частей автосцепки. Дефекты, возникшие в процессе производства или восстановления деталей, могут значительно сократить срок службы устройства. Резкие перепады температур, повышенная влажность и попадание абразивных частиц (песка, пыли) способствуют ускоренному износу механизмов. Исследования, проведенные на того же сайта[1], показали, что наиболее часто встречающимися причинами отказов автосцепных устройств являются износ и деформация ключевых компонентов, нарушения в процессе ремонта и монтажа, влияние внешних факторов и неправильная эксплуатация. Длительная эксплуатация приводит к значительному износу шипов, замкодержателей и других элементов, что ослабляет сцепление и может привести к саморасцепу. Внедрение современных материалов, улучшенных конструкций и регулярного контроля технического состояния автосцепного устройства способствует значительному снижению частоты отказов и повышению безопасности перевозок.

Отказы автосцепного устройства могут быть вызваны различными причинами, связанными как с эксплуатационными факторами, так и с конструктивными особенностями. Основные причины отказов включают естественный износ деталей, механические повреждения, нарушения в эксплуатации, а также заводские дефекты.

Одним из наиболее распространенных факторов, влияющих на частоту отказов, является износ элементов автосцепки, таких как замковый механизм, поглощающий аппарат и сцепные поверхности. Постоянные динамические нагрузки, удары при сцепке и торможении, а также воздействие климатических условий (перепады температур, влага, коррозия) ускоряют процесс износа.

Еще одним фактором является недостаточное техническое обслуживание. Несвоевременная диагностика и замена изношенных деталей могут привести к их внезапному выходу из строя в процессе движения. Влияние оказывают и производственные дефекты, такие как неточные размеры деталей или низкое качество материалов, что сокращает срок службы автосцепного устройства.

Таким образом, частота отказов автосцепки зависит от множества факторов, и для их снижения необходимо комплексное техническое обслуживание, контроль качества сборки и соблюдение правил эксплуатации. Регулярные проверки и применение современных материа-

лов позволяют значительно повысить надежность автосцепного устройства и минимизировать риск аварийных ситуаций.

Методы обеспечения надежной и безопасной работы автосцепного устройства:

1. Визуальный осмотр-проводится для обнаружения внешних повреждений, трещин, деформаций и износа деталей. Особое внимание уделяется состоянию корпуса автосцепки, замкового механизма и поглощающего аппарата. Визуальный осмотр рекомендуется проводить регулярно, особенно перед началом рейса и после значительных механических воздействий.

2. Проверка с использованием шаблонов-для оценки износа и соответствия размеров деталей автосцепного устройства применяются специальные шаблоны, такие как комбинированный шаблон. С его помощью проверяют исправность действия предохранителя замка, ширину зева автосцепки, износ малого и большого зубьев, а также другие параметры. Правильное использование шаблонов позволяет выявить критические износы и деформации деталей [2].

3. Функциональные испытания-проверка работы механизмов автосцепки осуществляется путем имитации процессов сцепления и расцепления вагонов. Это позволяет выявить заедания, неправильную работу замкового механизма и другие функциональные отклонения. Такие испытания проводятся как в депо, так и непосредственно на линии при техническом обслуживании.

4. Неразрушающий контроль-для обнаружения скрытых дефектов, таких как внутренние трещины или дефекты материала, применяются методы неразрушающего контроля, включая ультразвуковую дефектоскопию, магнитопорошковый и капиллярный контроль. Эти методы особенно важны для проверки критически нагруженных элементов автосцепного устройства.

В зависимости от типа подвижного состава и условий эксплуатации устанавливаются различные виды осмотров автосцепного устройства:

1. Наружный осмотр: проводится при текущем отцепочном ремонте вагонов и технической ревизии. Включает проверку состояния видимых частей автосцепки без ее разборки.

2. Полный осмотр: выполняется при капитальном и депо-ском ремонте. Предусматривает разборку автосцепного устройства, детальную проверку всех его компонентов и замену изношенных деталей [3].

Соблюдение регламентов технического обслуживания и применение указанных методов диагностики позволяют поддерживать автосцепное устройство в исправном состоянии, повышая безопасность и надежность железнодорожных перевозок.

Для обеспечения надежной работы автосцепного устройства и снижения частоты его отказов необходимо применять комплексный подход, включающий профилактические меры, регулярный контроль и повышение квалификации персонала.

Своевременное техническое обслуживание и регулярные осмотры позволяют выявлять и устранять потенциальные неисправности на ранних стадиях. Особое внимание следует уделять проверке состояния поглощающих аппаратов, замковых механизмов и других критически важных элементов автосцепки. Рекомендуется использовать специализированные стенды для испытаний и ремонта поглощающих аппаратов, что позволяет более точно оценить их техническое состояние и продлить срок службы [4].

Анализ отказов показывает, что значительная часть обрывов тягеловесных поездов происходит из-за недостаточной прочности перемычки хвостовика автосцепки. Усиление этой детали и использование более прочных материалов могут существенно снизить риск подобных отказов [5].

Обучение и регулярная аттестация работников, ответственных за обслуживание и ремонт автосцепного оборудования, способствуют повышению качества проводимых работ и снижению вероятности ошибок, приводящих к отказам. Проведение сетевых школ и тренингов, направленных на изучение современных методов диагностики и ремонта автосцепок, является эффективной мерой в этом направлении [6].

Ведение подробной статистики отказов автосцепного устройства позволяет выявлять наиболее уязвимые элементы и разрабатывать меры по их укреплению. Организация качественного расследования и анализа причин отказов способствует разработке эффективных профилактических мероприятий и повышению общей надежности системы [7].

Комплексная реализация указанных мер позволит существенно снизить частоту отказов автосцепного устройства, повысить безопасность и эффективность железнодорожных перевозок.

Для снижения износа замкового механизма автосцепного устройства рекомендуется применять следующие меры:

1. Регулярное техническое обслуживание и контроль состояния деталей: Периодические осмотры и проверки замкового механизма позволяют своевременно выявлять износ и повреждения. При обнаружении износа, превышающего допустимые нормы, необходимо проводить восстановительные работы, такие как наплавка и последующая обработка деталей до номинальных размеров. Например, выступы замка при износе на глубину более 5 мм допускается наплавлять с последующей обработкой до альбомных размеров [8].

2. Использование качественных смазочных материалов: Применение соответствующих смазок на трущихся поверхностях замкового механизма снижает коэффициент трения, что уменьшает износ деталей и продлевает срок их службы. Регулярное обновление смазочного слоя и использование смазочных материалов, рекомендованных производителем, являются важными мерами профилактики износа [2].

Соблюдение этих рекомендаций способствует повышению надежности и долговечности замкового механизма автосцепного устройства, обеспечивая безопасность и эффективность железнодорожных перевозок.

В результате проведенного исследования можно сделать несколько важных выводов, которые касаются как технического состояния автосцепных устройств, так и практики их обслуживания. Анализ отказов автосцепных устройств на основе данных различных источников, таких как [rollingstock.narod.ru](http://rollingstock.narod.ru), показывает, что частота неисправностей напрямую зависит от комплекса факторов, включая эксплуатационные условия, конструктивные особенности и уровень технического обслуживания.

Наиболее часто встречающимися причинами отказов являются механический износ ключевых компонентов, такие как замкодержатели и тяговые хомуты, а также деформация элементов из-за воздействия высоких динамических нагрузок, климатических условий и дефектов производства. Влияние этих факторов приводит к снижению эффективности сцепления и увеличению вероятности саморасцепов, что в свою очередь сказывается на безопасности движения и надежности подвижного состава.

Периодические осмотры, использование износостойких материалов, а также внедрение современных методов диагностики, таких как неразрушающий контроль и функциональные испытания, значительно повышают надежность автосцепок. Важно отметить, что внедрение систем мониторинга в реальном времени и улучшение технологий ремонта играют ключевую роль в снижении частоты отказов и повышении общей безопасности перевозок.

Также стоит выделить роль человеческого фактора в обслуживании автосцепных устройств. Повышение квалификации персонала, обучение современным методам диагностики и ремонту, а также соблюдение регламентов технического обслуживания способствуют снижению вероятности ошибок при эксплуатации и повышению качества работы обслуживающего персонала.

Таким образом, комплексный подход, включающий улучшение конструктивных элементов автосцепок, использование современных материалов, внедрение технологий мониторинга и регулярное техни-

ческое обслуживание, является основой для повышения надежности и безопасности железнодорожных перевозок. Важно также отметить, что ведение статистики отказов и анализ причин неисправностей позволяют своевременно выявлять уязвимые места в конструкции и эксплуатации автосцепных устройств, разрабатывать профилактические меры и укреплять элементы, подверженные износу. Все эти меры совместно помогут значительно снизить частоту отказов, предотвратить аварийные ситуации и повысить общую эффективность железнодорожного транспорта.

### Список литературы:

1. Информационный сайт о железнодорожных вагонах: конструкция, устройство, расчет // Возможные неисправности автосцепного устройства // [Электронный ресурс], URL: [https://rollingstock.narod.ru/coupling\\_disrepair.htm](https://rollingstock.narod.ru/coupling_disrepair.htm)
2. Бизнес-Актив: железнодорожное оборудование // Обслуживание автосцепного устройства // [Электронный ресурс], URL: [https://gdzp.ru/poleznaya-informaciya/avtoscepnoe-ustroystvo/obslyuzhivanie-avtoscepного-ustroystva/?utm\\_source=chatgpt.com](https://gdzp.ru/poleznaya-informaciya/avtoscepnoe-ustroystvo/obslyuzhivanie-avtoscepного-ustroystva/?utm_source=chatgpt.com)
3. [Электронный ресурс], URL: [https://docs.cntd.ru/document/1200058109?utm\\_source=chatgpt.com](https://docs.cntd.ru/document/1200058109?utm_source=chatgpt.com)
4. DisserCat // Повышение надежности автосцепного устройства грузовых вагонов на основе совершенствования контроля технического состояния пружинно-фрикционных поглощающих аппаратов при ремонте // [Электронный ресурс], URL: <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-nadezhnosti-avtostsepnogo-ustroistva-gruzovykh-vagonov-na-osnove-sovershenstvovan>

## 1.7. ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

### АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ PSA В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭТИЛЕНА

*Рахимли Фазил Радиг*

*доктор философии по химии углеводородов,  
Азербайджанский государственный  
университет нефти и промышленности,  
Азербайджан, г. Баку*

### PROCESS ANALYSIS OF HYDROGEN PURIFICATION USING PSA TECHNOLOGY IN ETHYLENE PRODUCTION

*Fazil Rahimli*

*PhD in Petrochemical Chemistry,  
Azerbaijan State Oil and Industry University,  
Azerbaijan, Baku*

**Аннотация.** Чистота водорода критична для различных промышленных приложений, включая топливные элементы, гидрогенизацию и хранение энергии. Данное исследование посвящено процессу адсорбции с переменным давлением (PSA), применяемому для очистки водорода, побочного продукта производства этилена. Экспериментальные испытания проводились на этиленовом заводе с использованием установки PSA, оснащенной несколькими адсорбционными сосудами, содержащими адсорбенты  $\text{SiO}_2$ , активированный уголь и  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ . Газовая хроматография подтвердила чистоту продукта и минимальные уровни примесей, что подчеркивает его эффективность в производстве этилена.

**Abstract.** Hydrogen purity is critical for diverse industrial applications, including fuel cells, hydrogenation processes, and energy storage. This study investigates the Pressure Swing Adsorption (PSA) process applied to purify hydrogen, a byproduct of ethylene production. Experimental trials were conducted at an ethylene plant using a PSA unit equipped with multiple adsorber vessels containing  $\text{SiO}_2$ , activated carbon, and  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  adsorbents. Gas chromatography analysis confirmed the

product purity and minimal impurity levels, highlighting its efficiency in ethylene production.

**Ключевые слова:** очистка водорода, адсорбция при переменном давлении (PSA), производство этилена, адсорбирующие материалы, рекуперация водорода.

**Keywords:** Hydrogen purification, Pressure Swing Adsorption (PSA), ethylene production, adsorbent materials, hydrogen recovery.

**Введение.** Чистота водорода играет решающую роль в различных областях, таких как технологии топливных элементов, промышленные процессы и двигатели внутреннего сгорания. Водород высокой чистоты, соответствующий стандартам >99,99 об.%, является необходимым для топливных элементов транспортных средств [1], тогда как различные уровни чистоты влияют на процесс горения, производительность и выбросы в двигателях с искровым зажиганием [7]. Передовые технологии очистки, включая адсорбцию при переменном давлении (PSA) и криогенную очистку, играют ключевую роль в обеспечении требуемого уровня чистоты водорода для его эффективного и безопасного использования в различных сферах. Среди наиболее распространенных примесей в водороде встречаются метан, кислород, азот, оксид углерода, диоксид углерода, аммиак, формальдегид, муравьиная кислота, сероводород, хлороводород, причем их концентрации варьируются в диапазоне от 0,0191 до 315 мкмоль/моль [5] [8] [10]. Эти примеси могут негативно воздействовать на топливные элементы и инфраструктуру, что делает соблюдение строгих стандартов чистоты водорода крайне необходимым [3]. Различные методы очистки водорода были изучены в научных исследованиях.

Криогенное разделение, абсорбция, адсорбция, мембранное разделение и кислородопроницаемые мембраны (ОПМ) относятся к числу исследованных методов [4][11]. Криогенное разделение, хотя и является энергоемким процессом, часто комбинируется с мембранным разделением. Для очистки водорода также используются адсорбция при переменном давлении (PSA) и химическая абсорбция, при этом PSA обеспечивает более высокую чистоту, но при более низких уровнях выхода продукта [9].

Адсорбция при переменном давлении (PSA) широко применяется для очистки водорода, особенно в таких процессах, как сезонное хранение энергии и заправочные станции водорода. Исследования показали, что системы PSA могут эффективно разделять водород из различных газовых смесей, достигая высокой чистоты на уровне примерно

99,95% [6]. Для повышения энергоэффективности и уменьшения объема системы были разработаны модульные PSA-системы с несколькими адсорбционными слоями, демонстрирующие перспективные результаты в процессах разделения и очистки водорода [12] [2]. Эти достижения в технологии PSA подчеркивают ее значимость для отраслей, зависящих от высокочистого водорода, а также необходимость дальнейших исследований и разработок для ее оптимизации и применения в различных промышленных процессах. Существует множество методов очистки водорода, включая криогенное разделение, абсорбцию, адсорбцию и мембранное разделение. Однако остаются пробелы в понимании того, как технология PSA работает в различных условиях и с различными адсорбентами. Большинство исследований сосредоточены на общей производительности PSA, а не на специфических адсорбентах, таких как  $\text{SiO}_2$ , активированный уголь и  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , в реальных промышленных условиях. Проблемы, связанные с удалением примесей, селективностью адсорбентов и эффективностью извлечения водорода, изучены недостаточно. Данное исследование восполняет эти пробелы путем тестирования различных адсорбентов в системе PSA на этиленовом производстве для анализа их влияния на чистоту водорода.

**Экспериментальная часть.** Эксперименты проводились на этиленовом заводе, где водород является побочным продуктом процесса производства этилена. В установке адсорбции при переменном давлении (PSA), используемой в ходе экспериментов, было несколько адсорберных сосудов, заполненных адсорбентами, а также высоконапорные клапаны, датчики давления и система управления для контроля цикла. Газовая смесь, поступающая в PSA-установку, состояла из водорода, метана, этана, этилена и других углеводородов, типичных для отходящего газа этиленового производства. Основной задачей контроля качества продукта было обеспечение требуемой чистоты водорода, а также выявление перегрузки адсорбционного материала, что могло указывать на сбой в процессе. Чистота продукта контролировалась путем регулярного ручного отбора проб. Ключевым примесным компонентом в продукте PSA является  $\text{CH}_4$ , тогда как  $\text{CO}$  является критическим для последующих стадий обработки. Процесс адсорбционного разделения с непрерывной подачей продукта состоит из нескольких сосудов высокого давления, заполненных адсорбентом, соединительных трубопроводов и соответствующих управляющих клапанов. Во время работы как минимум один адсорбер находится в рабочем цикле под высоким давлением и отделяет примеси от газового потока, в то время как другие адсорберы проходят процесс регенерации. Программное управление обеспечивает последовательность

операций и смену адсорберов, чтобы поддерживать чистоту продукта. Таким образом, программная система гарантирует, что до того, как емкость активного адсорбера будет исчерпана, другой адсорбер будет регенерирован и подготовлен для работы. Способность адсорбента поглощать газ снижается при повышении температуры подачи, однако эффект продувки улучшается при более высоких температурах. Оптимальная температура для процесса PSA составляет от 20°C до 40°C. Хотя допустимы более высокие температуры, их увеличение приводит к снижению адсорбционной емкости. В то же время адсорбция при температурах ниже 20°C нежелательна из-за негативного влияния низких температур на процесс продувки.

Таблица 1 представляет характеристики различных адсорбентов, используемых в процессе. Эти характеристики включают массу адсорбента, активный состав и внешний вид каждого типа адсорбента.

**Таблица 1.**

### Характеристики адсорбентов

Тип адсорбента	Масса адсорбента (кг)	Активный состав	Внешний вид
A	500	SiO <sub>2</sub>	Белый, без запаха, гранулированный
B	900	Активированный уголь	Белый, без запаха, гранулированный
C	14300	Цеолиты	Белый, без запаха, гранулированный

Экспериментальное исследование было направлено на процесс адсорбции с изменением давления (PSA), применяемый для очистки сырого водорода, побочного продукта процесса крекинга на этиленовом заводе. Газ на входе, состоящий из 91,86% H<sub>2</sub>, 0,3% N<sub>2</sub>, 0,21% CO, 4,62% CH<sub>4</sub> и 59 ppm O<sub>2</sub>, первоначально обрабатывался при контролируемых условиях 40°C и давлении 32 атм. После поступления в установку PSA, газ последовательно проходил через слои адсорбента, включающие SiO<sub>2</sub>, активированный уголь и Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>, предназначенные для селективного удаления загрязняющих веществ, таких как CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>. В ходе фазы адсорбции эти примеси эффективно адсорбировались, в то время как водород высокой чистоты с составом 99,99% H<sub>2</sub>, 11 ppm N<sub>2</sub>, без CO, 1 ppm CH<sub>4</sub> и 6 ppm O<sub>2</sub> выходил как продукт. Следующие фазы десорбции включали снижение давления до 0,01 атм для регенерации адсорбентов, что обеспечивало эффективную очистку водорода и подготовку системы к последующим циклам. Газохромато-

графический анализ подтвердил достигнутую чистоту водорода и минимальные уровни примесей как в продуктовой, так и в рафинатной потоках, что подтвердило эффективность процесса PSA при заданных эксплуатационных параметрах. Кроме того, гипотетический анализ предполагает, что повышение температуры до 50°C может незначительно снизить чистоту водорода до примерно 99,97%. Экспериментальные результаты продемонстрировали стабильную работу с высокой восстановлением водорода (85%) и стабильной работой в течение нескольких циклов, что подчеркивает пригодность технологии PSA для улучшения чистоты водорода в промышленных приложениях, особенно в нефтехимическом секторе.

**Результаты.** Экспериментальное исследование процесса адсорбции с изменением давления (PSA) для очистки водорода на этиленовом заводе продемонстрировало стабильную работу и достижение водорода высокой чистоты. Газохроматографический анализ подтвердил среднюю чистоту водорода 99,99% с минимальными примесями: 11 ppm N<sub>2</sub>, без CO, 1 ppm CH<sub>4</sub> и 6 ppm O<sub>2</sub> в продуктовом потоке. Тесты на чувствительность к температуре показали оптимальную эффективность адсорбции при 40°C, что обеспечивало наивысшую чистоту, в то время как незначительное повышение температуры до 50°C слегка снижало чистоту до 99,97%. Фазы десорбции при 0,01 атм эффективно регенерировали адсорбенты, обеспечивая стабильную работу в течение нескольких циклов. Установка PSA сохраняла высокий коэффициент восстановления водорода, составивший 85%, что подчеркивает её эффективность для промышленных масштабов.

Эти результаты подтверждают целесообразность интеграции технологии PSA в этиленовые производственные мощности для повышения восстановления водорода и его чистоты, что способствует устойчивым практикам и оптимизации ресурсов в нефтехимической промышленности. В будущем исследования могут сосредоточиться на дальнейших стратегиях оптимизации для улучшения энергоэффективности и экономической жизнеспособности систем PSA в промышленной среде.

### Список литературы:

1. Adachi, T. (2022). Production of High-Purity Hydrogen Through Ammonia Decomposition and Gas Removal (pp. 391–400). [https://doi.org/10.1007/978-981-19-4767-4\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-19-4767-4_25)
2. Azira, N., Muin, A., Isah, A., Asli, U., Sadikin, A., Norazahar, N., Kamaruddin, M., Hassim, M., Shin, H., Azman, N., & Johor, J. (2021). A Short Review on Various Purification Techniques Suitable for Biohydrogen-Mixed Gases. *Journal of Energy and Safety Technology (JEST)*, 3, 1.

3. Beurey, C., Gozlan, B., Carre, M., Bacquart, T., Morris, A., Moore, N., Arrhenius, K., Meuzelaar, H., Persijn, S., Rojo, A., & Murugan, A. (2021). Review and Survey of Methods for Analysis of Impurities in Hydrogen for Fuel Cell Vehicles According to ISO 14687:2019. *Frontiers in Energy Research*, 8, 615149. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.615149>
4. Jia, J., He, G., Zhang, Y., & Caro, J. (2020). Hydrogen purification through dual-phase oxygen permeable membrane with excellent stability. *Angewandte Chemie*, 133. <https://doi.org/10.1002/ange.202010184>
5. Kalman, V., Voigt, J., Jordan, C., & Harasek, M. (2022). Hydrogen Purification by Pressure Swing Adsorption: High-Pressure PSA Performance in Recovery from Seasonal Storage. *Sustainability*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/su142114037>
6. Karine, Arrhenius., Oliver, Bükler., Andreas, Fischer., Stefan, Persijn., Niamh, Moore. (2020). Development and evaluation of a novel analyser for ISO14687 hydrogen purity analysis. *Measurement Science and Technology*, 31(7) <https://doi: 10.1088/1361-6501/AB7CF3>
7. Lee, T., Kim, T., Park, T., Choi, W., Kim, H., & Lee, H. (2013). Hydrogen Impurities Analysis From Proton Exchange Membrane Hydrogen Production. *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 24. <https://doi.org/10.7316/KHNES.2013.24.4.288>
8. Park, J. N., Jeon, M. H., Hong, S. H., & Kim, C.-E. (2018). PSA System for Compact Hydrogen Station. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 918–921. <https://doi.org/10.23919/ICEMS.2018.8549356>
9. Pawulski, Richard., Houle, Sylvain., Fillion, Brian., Chen, Yudong., Norval, Graeme, William. (2020). Purification of hydrogen. *Publication of US10882744B2*
10. Pluvinage, G., & Julien, C. (2022). Risks Associated with the Use of Hydrogen as an Energy Carrier or Source. *Journal of Energy and Power Technology*, 4, 1–1. <https://doi.org/10.21926/jept.2203029>
11. Pratiwi, V., Sutikno, J., & Handogo, R. (2017). Simulation of Hydrogen Purification using Two Bed System Pressure Swing Adsorption. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 14. <https://doi.org/10.12962/j23546026.y2017i2.2272>
12. Sharip, M. S., Sazali, N., Ibrahim, H., Jamaludin, A. S., & Aziz, F. (2020). A Review on Effectiveness of Numerous Technologies by Utilizing Hydrogen. In M. N. Osman Zahid, R. Abd. Aziz, A. R. Yusoff, N. Mat Yahya, F. Abdul Aziz, & M. Yazid Abu (Eds.), *iMEC-APCOMS 2019* (pp. 423–428). Springer Singapore.

## 1.8. ЭНЕРГЕТИКА

### КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ЗОНЫ НАДЕЖНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА К-СРЕДНИХ НА НЕЙРОННЫХ ПРОЦЕССОРАХ

***Крупенёв Дмитрий Сергеевич***

*канд. техн. наук, доцент,*

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
РФ, г. Иркутск*

***Бояркин Денис Александрович***

*канд. техн. наук,*

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
РФ, г. Иркутск*

***Груздева Татьяна Владимировна***

*канд. физ.-мат. наук,*

*Институт динамики систем и теории управления имени В.М.  
Матросова СО, РФ, г. Иркутск*

### CLUSTERING OF ELECTRIC POWER SYSTEMS INTO RELIABILITY ZONES USING THE K-MEANS METHOD ON NEURAL PROCESSORS

***Dmitry Krupenev***

*Candidate of Technical Sciences,*

*Associate Professor,*

*Melentyev Energy Systems Institute SB RAS,  
Russia, Irkutsk*

***Denis Boyarkin***

*Candidate of Technical Sciences,*

*Melentyev Energy Systems Institute SB RAS,  
Russia, Irkutsk*

## **Tatyana Gruzdeva**

*Candidate of Physico-Mathematical Sciences,  
Matrosov Institute of System Dynamics and Control Theory SB RAS,  
Russia, Irkutsk*

**Аннотация.** При оценке балансовой надёжности выполняется многократное решение задачи оптимизации, а именно минимизации дефицита мощности. При этом современные энергосистемы включают в себя огромное количество элементов со своими свойствами и спецификой работы. Всё это приводит к росту размерности данных, описывающих энергосистему и вычислительным трудностям при выполнении расчётов. Для снижения размерности в энергосистемах выделяются укрупненные узлы – зоны надёжности, объединяющие в себе группы элементов. В статье для выделения зон надёжности предлагается использовать метод *k*-средних, реализованный на нейронном процессоре.

**Abstract.** When assessing adequacy, a multiple solution of the optimization problem is performed, namely, minimization of power deficit. At the same time, modern energy systems include a huge number of elements with their own properties and specifics of operation. All this leads to an increase in the dimensionality of the data describing the energy system and computational difficulties in performing calculations. To reduce the dimensionality in power systems, enlarged nodes are identified - reliability zones, combining groups of elements. In the article, the *k*-means method implemented on a neural processor is proposed to be used to identify reliability zones.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система; балансовая надёжность; зона надёжности; кластеризация; метод *k*-средних; NPU.

**Keywords:** electric power system; adequacy; reliability zone; clustering; *k*-means method; NPU.

## **Введение**

Электроэнергетические системы (ЭЭС) включают в себя сотни тысяч разнородных элементов, работающих в общем режиме работы [14], в числе которых блоки генерации, электростанции, линии электропередачи, трансформаторы, установки потребления и др. Для стабильной работы ЭЭС как системы регулярно проводятся мероприятия по поддержанию и повышению её надёжности. Для обоснования таких мероприятий выполняются различные аналитические расчёты, в том числе оценка балансовой надёжности [1,6,9]. Для этого, как правило, используется методика, основанная на методе Монте-Карло [10], кото-

рая является наиболее вычислительно эффективной по сравнению с другими используемыми методами [4]. Размерность современных ЭЭС, разнообразие свойств её элементов делают анализ балансовой надёжности вычислительно сложным даже при использовании метода Монте-Карло. В таком случае прибегают к снижению размерности исходной задачи, например, к укрупнению структуры рассматриваемой ЭЭС (кластеризации). Для этого ЭЭС разделяется на зоны надёжности (ЗН), включающие в себя различные группы элементов системы, формируются энергетические расчетные модели (ЭРМ), при этом внутри ЗН исключаются сетевые ограничения.

Формирование ЭРМ выполняется, как правило, до проведения расчётов и принимается как новая структура ЭЭС, которая остается неизменной для всего периода, для которого выполняется оценка балансовой надёжности. В этом случае наиболее широко используемым способом определение границ ЗН является экспертный, наиболее существенными недостатками которого являются временные затраты. Однако, может возникнуть необходимость многократной кластеризации в цикле оценки балансовой надёжности. Такое требование возникает при существенном изменении параметров ЭЭС в течении расчетного периода и, соответственно, влиянии этих параметров на возможности сети по передачи мощности. Также это может быть обусловлено тем, что современные ЭЭС имеют сложную структуру с большим разнообразием энергетического оборудования. В таких случаях применение экспертного подхода невозможно, возникает необходимость применения быстрых методов кластеризации, способных уточнять структуру ЭРМ при оценке балансовой надёжности, не оказывая существенного влияния на совокупное время выполнения расчётов. В практике решения задач анализа систем разработаны различные методы кластеризации [2,7], но для оценки балансовой надёжности формализованных методик кластеризации не существует. В статье предлагается использование одного из самых простых, но эффективных методов кластеризации – метода  $k$ -средних, ускоренного за счёт адаптации к работе на тензорных процессорах.

### **Постановка задачи кластеризации ЭЭС**

Для максимально быстрого и точного решения задачи кластеризации ЭЭС на ЗН и формирования ЭРМ необходимо разработать подход, который будет максимально полно отражать влияющие критерии и ограничения на уровень БН ЭЭС и позволит достаточно быстро и адаптивно проводить кластеризацию ЭЭС в процессе проведения исследований.

При формировании алгоритма кластеризации ЭЭС на зоны надежности необходимо получить функцию  $a: X \rightarrow Z$ , которая каждый узел ЭЭС ( $x \in X$ ) включает в зону надежности  $z \in Z$ . В рассматриваемом случае множество  $Z$ , т.е. количество зон надежности, неопределенно. Оптимальное число зон надежности необходимо определить в процессе вычислений. Стоит отметить, что, как и в любом примере кластеризации, для решаемой задачи справедлива теорема невозможности Клейнберга, в которой указывается, что не существует оптимального алгоритма кластеризации. Каждый применяемый алгоритм будет вносить свою специфику в конечное решение. Это будет зависеть от выбранного критерия и метрики кластеризации.

Решением задачи кластеризации ЭЭС будет являться ее деление, удовлетворяющее заданному критерию оптимальности. В рассматриваемом случае критерием оптимальности выступает минимизация числа зон надежности:

$$Z \rightarrow \min_{\rho}. \quad (1)$$

Стремление к минимуму числа зон надежности является естественным, так как это в дальнейшем анализе балансовой надежности приведет к снижению размерности ЭРМ.

Ограничением при решении поставленной задачи будет выступать ограничение, заданное на метрику, которая формируется из различных признаков. В рассматриваемом случае метрика кластеризации должна включать как технические, так и экономические признаки. К техническим признакам можно отнести: установленную мощность генерирующего оборудования в узлах ЭЭС; среднее значение числа часов использования установленной мощности в узлах ЭЭС; сезонные максимумы и минимумы потребления мощности в узлах ЭЭС; аварийность энергетического оборудования; нормативы на проведение плановых ремонтов энергетического оборудования; длины линий электропередачи (ЛЭП) между узлами ЭЭС; пропускные способности ЛЭП [15]. К экономическим: стоимость ввода генерирующих и сетевых объектов. От выбора метрики в итоге будет зависеть результат кластеризации. Метрика должна максимально отражать специфику работы ЭЭС и влияние учитываемых признаков на кластеризацию.

### **Кластеризация методом k-средних**

В настоящее время разработано достаточно большое количество алгоритмов кластеризации в наборах данных [3,5,8,12], каждый из которых обладает своей спецификой, имеет свои достоинства и недо-

статки. Метод k-средних (k-means) [5] – это один из наиболее популярных методов кластеризации, принадлежащий к классу методов разбиения. Он основан на разделении вершин графа на заданное число кластеров, так чтобы минимизировать сумму квадратов расстояний между вершинами и центрами кластеров.

Алгоритм k-means состоит из двух основных шагов: назначение элементов данных текущим ближайшим (по квадрату евклидова расстояния) центрам кластеров с последующим пересчетом центров как средних значений элементов данных, назначенных тем же кластерам. Алгоритм завершается, когда нет никаких изменений в назначениях кластеров достаточно большого количества элементов данных:

1. Выбираются начальные центры кластеров  $x_c^i \in \mathbb{R}^n, i \in I$ . Выбор начальных центров кластеров производится случайным образом, например из числа элементов данных, или по определенному алгоритму.

2. До тех пор, пока кластеры  $C_i$  изменяются, то есть изменяются координаты их центров  $x_c^i$ , выполняются следующие шаги:

2.1. Для каждой точки набора данных  $a^j, j \in J$ , определяется ближайший центр кластера  $i^*$  по формуле квадрата евклидова расстояния (2). Таким образом формируются кластеры  $C_i$ , состоящие из элементов данных, ближайших к центру  $x_c^i$ .

$$i^* \leftarrow \operatorname{argmin}_{i \in I} \sum_{j=1}^m \|a^j - x_c^i\|^2, \quad (2)$$

где  $m$  – количество элементов в наборе данных.

2.2. Для каждого кластера  $C_i, i \in I$  вычисляется новый центр  $x_c^i$  как среднее значение соответствующих координат всех точек, относящихся к данному кластеру (центр масс) по формуле (3):

$$C_i: x_c^i \leftarrow \frac{1}{|C_i|} \sum_{j: a^j \in C_i} a^j. \quad (3)$$

Наиболее трудоемкими операциями в данном алгоритме являются поиск ближайшего центра кластера и пересчет координат центров кластеров. Поскольку они могут выполняться одновременно для каждого элемента данных (кластера), часто применяются процедуры распараллеливания с общей памятью для ускорения работы алгоритма (SMA). Это делает перспективным использование таких процессоров,

которые позволяют эффективно выполнять параллельные вычисления, например GPU или NPU.

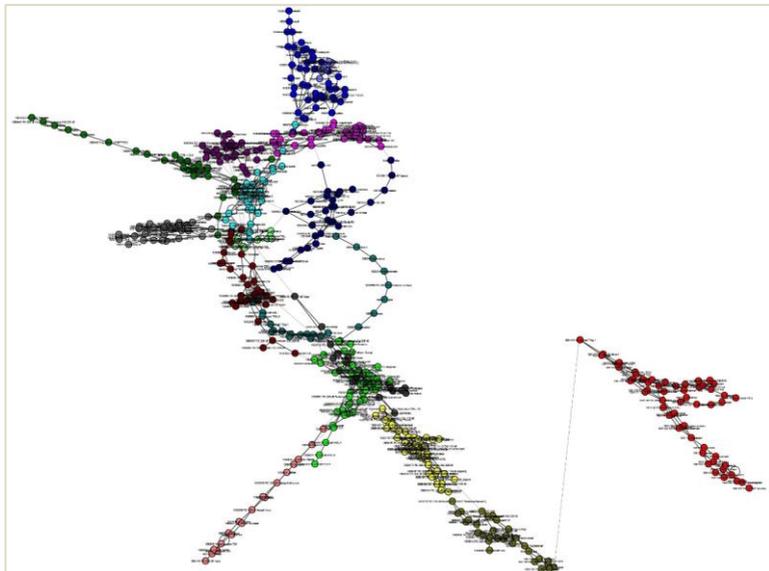
Нейронные процессоры (NPU) — это узкоспециализированные процессоры, разработанные специально для выполнения задач искусственного интеллекта (ИИ). Они оптимизированы для выполнения сложных и ресурсоемких математических вычислений, необходимых в алгоритмах машинного обучения и искусственных нейронных сетях. Наиболее интересными в контексте задачи являются тензорные процессоры. Такие процессоры работают с тензорами — объектами, которые могут быть представлены как многомерные массивы чисел. Тензорные процессоры специализированы для быстрого выполнения таких операций, как матричное умножение и свёртка, используемых для эмуляции свёрточных нейронных сетей, однако, они подходят для любых алгоритмов, которые могут быть представлены в виде операций с матрицами.

Как сказано выше, в этой статье мы предлагаем использовать реализацию NPU-ускоренного алгоритма k-means, в котором наиболее трудоемкие операции вычисления расстояний и пересчет центров кластеров представлены в виде матриц (говоря в контексте NPU, в виде тензоров) и операций над ними, которые выполняются очень эффективно на нейронных процессорах.

### Экспериментальные исследования

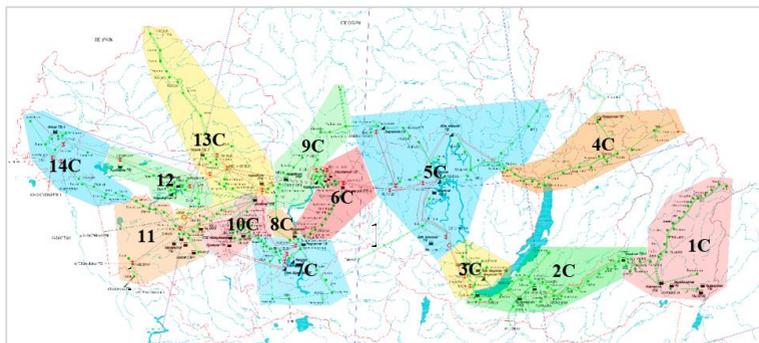
Для оценки работы алгоритма k-means, ускоренного NPU были выполнены экспериментальные исследования на тестовой схеме Объединенной энергосистемы (ОЭС) Сибири, которая включает в себя Алтайскую, Бурятскую, Иркутскую, Красноярскую, Кузбасскую, Новосибирскую, Омскую, Томскую, Хакасскую и Забайкальскую энергосистемы. Схема была представлена в виде неориентированного графа, в котором каждая из вершин характеризуется генерацией и нагрузкой, а ребра – линии, характеризуются длиной и напряжением. Таким образом задача сводится к кластеризации на графах. Исходные данные ОЭС Сибири были приняты в соответствии [13], полученный граф по схеме ОЭС Сибири состоит из 540 генерирующих и нагрузочных узлов (вершин) и 1025 линий электропередачи (рёбер).

На рисунке 1 показан результат работы алгоритма в виде графического представления разделения узлов ОЭС Сибири по зонам надежности (кластерам).



**Рисунок 1. Графическое представление отнесения узлов ОЭС Сибири к зонам надежности на основании применения алгоритма *k-means***

Та же кластеризация, но уже в границах географических регионов представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2. Результат кластеризации ОЭС Сибири на ЗН на основании применения алгоритма *k-means* (географическое представление)**

В результате выполнения кластеризации методом k-means было получено 14 зон надежности. Время, затраченное на кластеризацию, составило всего 0.05 с., для сравнения в предыдущей работе, где мы использовали алгоритм Лейдена [11], скорость кластеризации составила 1.16 с. Полученный результат является достаточным не только для проведения кластеризации ЭЭС перед проведением оценки балансовой надёжности, но и при необходимости изменения структуры системы в процессе расчёта без существенного изменения времени общего расчёта.

Что касается качества кластеризации, анализ полученных зон надёжности показывает, что алгоритм выполнил кластеризацию по наиболее узким местам ЭЭС с точки зрения плотности взаимосвязей и их пропускной способности, то есть полученное разбиение соответствует реальной обстановке. Полученные зоны надежности получились максимально независимыми с наименьшим количеством связей между друг другом. Такое деление при последующей оценке балансовой надежности будет хорошо определять загруженность связей и объектов энергетической инфраструктуры.

### **Заключение**

В представленном исследовании рассмотрена задача формирования энергетических расчетных моделей, которые используются при оценке балансовой надежности электроэнергетических систем. Был проведен анализ методов кластеризации, и определено, что одним из наиболее подходящих способов кластеризации ЭЭС на зоны надежности является метод k-средних (k-means).

На рисунке 2 видно, что при формировании зон надежности были учтены все основные ограничения на передачу мощности в ОЭС Сибири. Границы сформированных зон надежности коррелируют с соответствующими контролируруемыми сечениями в электрической сети, несмотря на то что информация о контролируемых сечениях явно не использовалась в рамках примененного подхода. Это говорит об адекватности полученного результата. Также применение метода k-means позволило существенно ускорить этап разбиения ЭЭС на ЗН, позволяя широко использовать процедуру кластеризации, включая её многократное выполнение в процессе расчёта, ранее это было невозможно.

Таким образом, можно заключить, что использование метода k-means позволяет формализовать определение зон надежности непосредственно в рамках выполнения расчетов, что способствует повышению эффективности решения задач анализа и синтеза балансовой надежности.

**Список литературы:**

1. 2021 Long-Term Reliability Assessment. December 2021. NERC. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/NERC\\_LT\\_RA\\_2021.pdf](https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Reliability%20Assessments%20DL/NERC_LT_RA_2021.pdf) (дата обращения: 06.04.2025).
2. Gheorghe G., Scarlatache F., Neagu B. Clustering in Power Systems. Applications. LAP Lambert Academic Publishing, 2016. – 264 p.
3. Gruzdeva T.V., Ushakov A.V. K-Means Clustering via a Nonconvex Optimization Approach // Lecture Notes in Computer Science. 2021. Vol. 12755. P.462-476.
4. Krupenev D., Boyarkin D., Iakubovskii D. Improvement in the computational efficiency of a technique for assessing the reliability of electric power systems based on the Monte Carlo method // Reliability Engineering & System Safety. 2020. № 204. 107171.
5. MacQueen, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations // Proc. 5th Berkeley Symp. On Math. Statistics and Probability. 1967. P. 281-297.
6. Probabilistic Adequacy and Measures. Technical Reference Report Final, July, 2018. NERC. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.nerc.com/comm/RSTC/PAWG/Probabilistic\\_Adequacy\\_and\\_Measures\\_Report.pdf](https://www.nerc.com/comm/RSTC/PAWG/Probabilistic_Adequacy_and_Measures_Report.pdf) (дата обращения: 06.04.2025).
7. Rouhani M., Mohammadi M., Aiello M. Soft clustering based probabilistic power flow with correlated inter temporal events // Electric Power Systems Research. 2022. №204. 107677.
8. Sarkar A., Ramalingam S. Graph Clustering: A Review. University of California publishing, 2020.
9. Ковалев Г.Ф., Крупенев Д.С., Лебедева Л.М. Системная надежность ЕЭС России на уровне 2030 г // Электрические станции. – 2011. – №2. – С. 44-47.
10. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Надежность систем электроэнергетики. Новосибирск: Наука, 2015. – 224 с.
11. Крупенев Д.С., Беляев Н.А., Бояркин Д.А., Якубовский Д.В. Кластеризация электроэнергетических систем на зоны надежности при оценке балансовой надежности. Часть 2 // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2024. – № 2. – С. 34-44.
12. Мандель И.Д. Кластерный анализ. М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
13. Приказ Минэнерго России от 28.02.2018 №121 “Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2018 - 2024 годы”. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/orders/sipr\\_ups/sipr\\_ups\\_18-24.pdf](https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/orders/sipr_ups/sipr_ups_18-24.pdf) (дата обращения: 06.04.2025).
14. Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1974. – 262 с.

15. Справочник по проектированию электрических сетей / Д.Л. Файбисович. – 4-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2012. – 376 с.

### **Источники финансирования**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-01090.

## **ПОВЫШЕНИЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ АСУ ТП НА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОДИОДОВ**

**Шакирьянов Эдуард Данисович**

канд. физ.-мат. наук, доцент,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
РФ, г. Уфа

**Чаинская Регина Алижановна**

студент,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
РФ, г. Уфа

## **INCREASING CYBERSECURITY OF APCS AT HYDROELECTRIC POWER STATIONS BY USING INFO DIODES**

**Eduard Shakiryarov**

PhD of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,  
Ufa State Petroleum Technological University,  
Russia, Ufa

**Regina Chainskaya**

Student,  
Ufa State Petroleum Technological University,  
Russia, Ufa

**Аннотация.** Статья рассматривает актуальные вопросы повышения кибербезопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) на гидроэлектростанциях (ГЭС) с использованием однонаправленных шлюзов (инфодиодов). В работе представлен анализ современных киберугроз, характерных для энергетической инфраструктуры, и обоснована необходимость применения инфодиодов как надежного средства защиты, а также представлено сравнение традиционных и однонаправленных шлюзов. Описаны принципы функционирования инфодиодов, которые обеспечивают физическую одностороннюю передачу данных, исключая возможность обратного воздействия на защищенные системы.

**Abstract.** The article considers current issues of enhancing the cybersecurity of automated process control systems (APCS) at hydroelectric power plants (HPPs) using unidirectional gateways (infodiodes). The paper presents an analysis of modern cyber threats typical for energy infrastructure and substantiates the need to use infodiodes as a reliable means of protection, as well as a comparison of traditional and unidirectional gateways. The operating principles of infodiodes, which provide physical one-way data transmission, eliminating the possibility of reverse impact on protected systems, are described.

**Ключевые слова:** кибербезопасность, АСУ ТП, гидроэлектростанции, инфодиоды, однонаправленные шлюзы, кибератаки

**Keywords:** cybersecurity, automated process control systems, hydroelectric power plants, infodiodes, one-way gateways, cyber attacks

Современная гидроэнергетика всё чаще сталкивается с угрозами кибератак, направленных на автоматизированные системы управления. В связи с этим возрастает необходимость в надёжных механизмах защиты данных. Традиционные решения, такие как межсетевые экраны и VPN, обладают определёнными уязвимостями, которые могут быть использованы злоумышленниками.

Гидроэлектростанции (далее – ГЭС), как критически важные объекты энергетической инфраструктуры, становятся мишенью для различных киберугроз. Эти угрозы могут привести к нарушению работы станции, повреждению оборудования, остановке генерации энергии и даже экологическим катастрофам. Для защиты от этих угроз (табл. 1) [3]. и предотвращения несанкционированного доступа к критически важным системам необходимо внедрение комплексных мер, включая использование однонаправленных шлюзов (инфодиодов), регулярное обновление систем, обучение персонала и мониторинг угроз в режиме реального времени.

*Таблица 1.*

**Киберугрозы, с которыми сталкиваются ГЭС**

№ п/п	Наименование атак	Описание	Риски
1	Целевые атаки (APT — Advanced Persistent Threats)	Долгосрочные и сложные атаки, направленные на получение доступа к системам управления ГЭС. Злоумышленни-	Получение контроля над АСУ ТП, манипуляция параметрами работы станции, остановка генерации

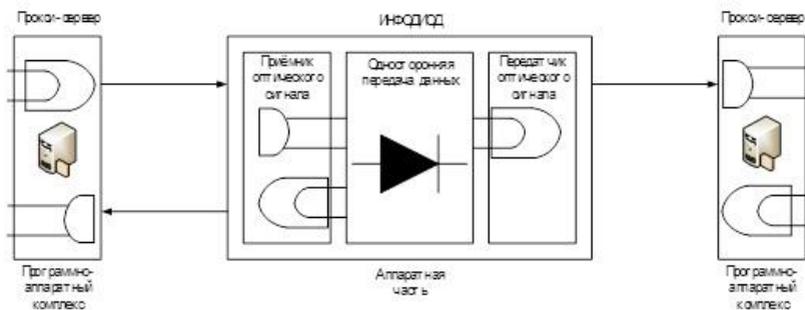
№ п/п	Наименование атак	Описание	Риски
		ки могут использовать фишинг, вредоносное ПО или уязвимости в программном обеспечении	
2	Атаки на промышленные системы (ICS/SCADA)	Атаки на системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) и промышленные системы управления (ICS), которые используются для контроля работы ГЭС	Нарушение работы оборудования, изменение параметров работы турбин, затворов и других критических систем
3	Вредоносное ПО (Malware)	Вирусы, черви, трояны и программы-шифровальщики (ransomware), которые могут проникать в сети ГЭС через уязвимости или человеческий фактор	Шифрование данных, остановка работы систем, утечка информации
4	Атаки нулевого дня (Zero-Day Exploits)	Использование неизвестных уязвимостей в программном обеспечении, для которых еще не выпущены исправления	Получение несанкционированного доступа к системам управления и данным
5	Инсайдерские угрозы	Умышленные или случайные действия сотрудников, которые могут привести к утечке данных или нарушению работы систем	Саботаж, утечка конфиденциальной информации, повреждение оборудования
6	DDoS-атаки (Distributed Denial of Service)	Атаки, направленные на перегрузку сетей и систем ГЭС, что приводит к их недоступности	Нарушение работы систем мониторинга и управления, остановка передачи данных
7	Угрозы для IoT и IIoT устройств	Атаки на устройства Интернета вещей (IoT) и промышленного Интернета вещей	Получение контроля над датчиками и системами, манипуляция данными

№ п/п	Наименование атак	Описание	Риски
		(IoT), которые используются для мониторинга и управления на ГЭС	
8	Социальная инженерия	Манипуляция сотрудниками для получения доступа к системам или данным (например, через фишинг или поддельные письма)	Утечка данных, установка вредоносного ПО
9	Угрозы для облачных сервисов	Атаки на облачные платформы, используемые для хранения данных или управления ГЭС	Утечка данных, нарушение работы систем
10	Физические киберугрозы	Компрометация физических устройств, таких как контроллеры, серверы или сетевые устройства	Повреждение оборудования, остановка работы станции

Однонаправленные шлюзы представляют собой устройства, обеспечивающие передачу данных в одном направлении. Физически это реализуется за счёт использования аппаратного разделения каналов передачи и приёма данных [1].

Основные компоненты инфодиодов (рис. 1) [2] включают:

- Передающий модуль, который отправляет данные, не имея возможности их принимать.
- Приёмный модуль, который получает информацию, но не может отправлять запросы обратно.



**Рисунок 1. Однонаправленная передача данных с помощью инфодиода**

Такая архитектура исключает возможность удалённого вмешательства в защищённую систему, что делает однонаправленные шлюзы эффективным инструментом для защиты промышленных сетей, например, когда передаются особо важные данные, например, в области управления энергосистемами или мониторинга состояния гидроэнергетических объектов [1].

Принцип работы инфодиодов основывается на физическом и логическом разделении потоков данных. В отличие от традиционных шлюзов, которые могут использовать два канала для приема и отправки данных, инфодиоды функционируют через один канал, что исключает риски утечек информации обратно в систему (табл. 2). Это устройство эффективно блокирует любые попытки передачи данных в обратном направлении, что делает его важным инструментом для защиты и надежности гидроэнергетических систем [2].

**Таблица 2.**

**Сравнение однонаправленных и традиционных шлюзов**

Характеристика	Однонаправленные шлюзы	Традиционные двунаправленные шлюзы
Направление передачи	Односторонняя	Двусторонняя
Безопасность	Высокая (физическая защита)	Зависит от настроек и обновлений
Производительность	Высокая	Зависит от нагрузки

Характеристика	Однонаправленные шлюзы	Традиционные двунаправленные шлюзы
Сложность внедрения	Низкая	Высокая
Применение	Критически важные системы	Корпоративные сети
Стоимость	Высокая начальная, низкая эксплуатационная	Низкая начальная, высокая эксплуатационная

ГЭС являются объектами критически важной инфраструктуры, требующими особого подхода к обеспечению информационной безопасности. Автоматизированные системы управления на таких объектах должны быть защищены от внешнего вмешательства, поскольку успешная атака на эти системы может привести к авариям и значительным экономическим потерям.

Инфодиоды применяются в гидроэнергетике для:

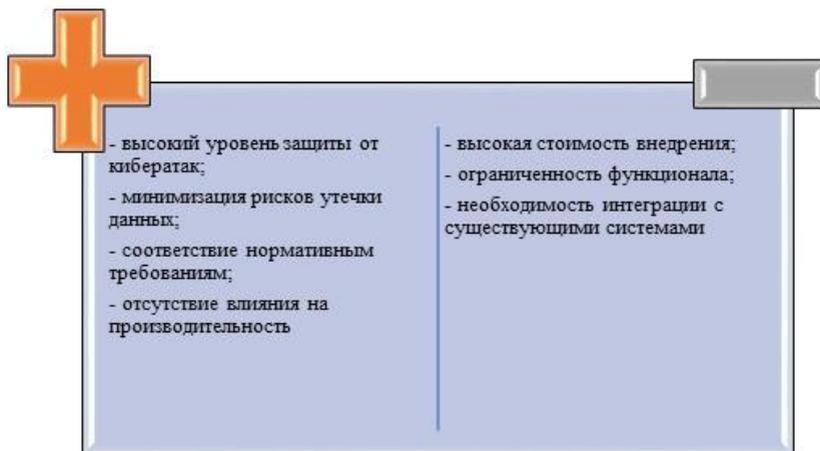
- Передачи данных мониторинга с ГЭС в центральные диспетчерские службы без риска обратного проникновения.
- Обеспечения безопасности удалённого контроля за состоянием оборудования без угрозы воздействия на систему.
- Разграничения уровней доступа между корпоративными и технологическими сетями.

Не так давно, компания «АМТ-ГРУП» анонсировала выход на рынок нового продукта собственной разработки – аппаратно-программного комплекса «InfoDiode», предназначенного для однонаправленной передачи данных. Разработчики подчеркивают универсальность решения: оно может быть использовано для обеспечения безопасности данных в государственных структурах, включая силовые ведомства, промышленные предприятия, организации топливно-энергетического комплекса, а также в коммерческих компаниях различных отраслей, работающих с закрытыми сетями [1].

В основу «InfoDiode» легли многолетний опыт и наработки «АМТ-ГРУП» в области внедрения систем однонаправленной передачи данных. В частности, компания успешно реализовала проекты по защите АСУ ТП на гидроэлектростанциях, входящих в состав «Рус-Гидро» [1].

В Российской Федерации использование однонаправленных систем передачи данных регулируется приказами Федеральной службы по техническому и экспортному контролю «ФСТЭК России» (№ 17, 21 и 31). Учитывая все плюсы и минусы «InfoDiode» (рис.2) «АМТ-ГРУП» предлагает ряд уникальных функций, которые расширяют воз-

возможности применения таких систем, открывая новые сценарии их использования и увеличивая спектр решаемых задач. Это делает решение особенно актуальным для организаций, требующих высочайшего уровня защиты данных [1].



**Рисунок 2. Достоинства и недостатки однонаправленных шлюзов**

### Выводы

В данной статье были рассмотрены основные киберугрозы, с которыми сталкиваются ГЭС, принцип работы однонаправленных шлюзов и сравнили их с традиционными, а также оценили достоинства и недостатки инфодиодов.

Таким образом, использование однонаправленных шлюзов в гидроэнергетике представляет собой эффективное решение для обеспечения кибербезопасности. Инфодиоды позволяют защитить критически важные системы управления ГЭС, обеспечивая безопасную передачу данных без риска обратного проникновения.

Несмотря на определённые ограничения, преимущества данной технологии делают её перспективным инструментом для энергетической отрасли. В дальнейшем возможна более широкая интеграция инфодиодов с другими средствами защиты, что повысит уровень безопасности автоматизированных систем.

### Список литературы:

1. Сайт компании АО «АМТ-ГРУП» / [Электронный ресурс] // АМТ GROUP : [сайт]. – URL: <https://www.amt.ru/> (дата обращения: 16.03.2025).
2. Архангельская, А. В. Шлюз однонаправленной гарантированной передачи данных / А. В. Архангельская, В. Г. Архангельский, В. В. Калмыков // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы / Министерство образования и науки РФ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург, 2013. № 4. С. 24-31. ISSN 2071-8217.
3. Архангельский В. Г. О противодействии новым угрозам при использовании однонаправленных шлюзов [Текст] / Архангельский В. Г., Лосев С. А. // Информатизация и связь. — 2012. — № 8. — С. 194–196.
4. Воронцов А.Г. Организация однонаправленных сетей передачи информации в условиях защищённой среды/ Воронцов А.Г., Петунин С.А — Текст : непосредственный // Вопросы кибербезопасности. — 2017. — № 2 (20). — С. 21-29. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-odnonapravlennyh-setey-peredachi-informatsii-v-usloviyah-zaschishe-nnoy-sredy> (дата обращения: 16.03.2025).

## РАЗДЕЛ 2.

### МАТЕМАТИКА

#### 2.1. ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА

##### ОБ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЯХ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕОРИИ ПЕРКОЛЯЦИИ

**Гордеев Иван Иванович**

*канд. физ.-мат. наук,  
доцент кафедры ИБ,  
Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева,  
РФ, г. Астрахань*

**Касмынин Борис Павлович**

*студент,  
Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева,  
РФ, г. Астрахань*

##### ON THE BASIC CONCEPTS OF PROBABILITY THEORY APPLIED IN PERCOLATION THEORY

**Ivan Gordeev**

*Candidate of Sciences in Physics and Mathematics,  
Associate Professor in Astrakhan State University  
named after V.N. Tatishchev,  
Russia, Astrakhan*

**Boris Kasmynin**

*Student in Astrakhan State University  
named after V.N. Tatishchev,  
Russia, Astrakhan*

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные понятия теории вероятностей, которые используются во многих прикладных областях, в частности, при моделировании задач теории перколяции. Также дается сравнение различий в терминологии у разных авторов и расшифровываются некоторые злоупотребления обозначениями, встречающиеся в литературе по теории вероятностей. За основу для рассмотрения основных понятий были взяты публикации по теории вероятностей трех преподавателей МГУ: А.Н. Колмогорова, А.Н. Ширяева, А.В. Шкляева. Отмечены некоторые некорректности формулировок у указанных авторов.

**Abstract.** The article examines the basic concepts of probability theory, which are used in many applied areas, in particular, in modeling percolation theory problems. It also provides a comparison of the differences in terminology among different authors and deciphers some of the abuses of notation found in the literature on probability theory. The basis for examining the basic concepts were publications on probability theory by three Moscow State University teachers: A.N. Kolmogorov, A.N. Shiryaev, A.V. Shklyaev. Some incorrect formulations by these authors are noted.

**Ключевые слова:** теория вероятностей, вероятностное пространство, исход, элементарное событие, событие, алгебра событий, сигма-алгебра.

**Keywords:** probability theory, probability space, outcome, elementary event, event, algebra of events, sigma algebra.

Теория перколяции, применяемая для моделирования протекания в случайных средах, рассматривается в целом ряде монографий и статей, посвященных как общим теоретическим вопросам [10, 1], так и прикладным вопросам [3, 13, 2, 4, 6, 9, 8, 7]. С точки зрения математики, теория перколяции использует для моделирования теорию вероятностей и теорию графов.

В данной статье рассматриваются основные понятия теории вероятностей, которые используются во многих прикладных областях, в частности, при моделировании задач теории перколяции. Наряду с рассмотрением основных понятий дается сравнение различий в терминологии у разных авторов и расшифровываются некоторые злоупотребления обозначениями, встречающиеся в литературе по теории вероятностей. За основу для рассмотрения основных понятий были взяты публикации по теории вероятностей трех преподавателей МГУ: А.Н. Колмогорова [11], А.Н. Ширяева [15], А.В. Шкляева [16].

В теории вероятностей активно используются понятия «исход» и «событие». В книге Ширяева предлагается обозначать исходы буквой  $\omega$ , добавляя к этой букве индекс, чтобы отличать разные исходы [15, с. 21]. Далее Ширяев предлагает называть исходы  $\omega_1, \dots, \omega_N$  элементарными событиями, а их совокупность

$$\Omega = \{ \omega_1, \dots, \omega_N \}$$

пространством элементарных событий или пространством исходов [15, с. 21]. Исходя из такого определения, можно считать, что понятие «исход» равносильно понятию «элементарное событие». Далее у Ширяева предлагается называть событиями все те подмножества  $A \subseteq \Omega$  для которых по условиям эксперимента возможен ответ одного из двух типов: «исход  $\omega \in A$ » или «исход  $\omega \notin A$ ». Мотивируя введение понятия «событие», Ширяев пишет, что обычно экспериментаторы «... интересуются не тем, какой конкретно исход имеет место в результате испытания, а тем, принадлежит ли исход тому или иному подмножеству всех исходов» [15, с. 27]. Исходя из сказанного Ширяевым, следует понимать слово «исход» как элемент, принадлежащий некоторому множеству событий, и соответственно слово «событие» следует использовать для множеств исходов, а слово «исход» для некоторого элемента множества. Здесь возникает интересный вопрос: следует ли считать элементарное событие событием? На самом деле, этот вопрос представляет интерес при рассмотрении множеств, состоящих из одного исхода. Вообще говоря, понятие множества  $\{\omega\}$ , состоящего из одного элемента  $\omega$ , не равносильно понятию этого элемента, но иногда в литературе этим различием пренебрегают. В литературе по теории вероятностей фраза «элементарное событие» иногда может пониматься как «исход  $\omega$ », а иногда как «событие  $\{\omega\}$ , состоящее из одного элемента (исхода)  $\omega$ ». Ширяев старается употреблять термин «элементарное событие» только в значении «исход  $\omega$ » и специально в отдельной таблице [15, с. 167] подчеркивает, что термины «исход» и «элементарное событие» в теории вероятностей соответствуют термину «элемент» в теории множеств.

Однако, у Ширяева в двух местах встречается фраза «пространство элементарных исходов» [15, с. 31, 37] и еще в одном месте встречается словосочетание «элементарных исходов» [15, с. 133]. Если термин «исход» строго соответствует термину «элементарное событие», то фраза «элементарный исход», по существу, является тавтологией.

В свою очередь, Колмогоров [11] практически не использует термин «исход», а предпочитает термин «элементарное событие».

Еще один преподаватель из МГУ, Шкляев А.В., наоборот, не использует словосочетание «элементарное событие», а всегда говорит об «исходах», хотя зачем-то во многих местах добавляет к слову «исход» прилагательное «элементарный», и фактически использует словосочетание «элементарный исход» как синоним слова «исход» [16].

Шкляев А.В. в лекциях по теории вероятностей приводит пример 8.3 [16, § 8.2], в котором строится множество  $A_0$ , являющееся подмножеством полуинтервала  $(0; 1]$  и удовлетворяющее двум условиям:

1. для любого  $x \in (0; 1]$  найдется такой элемент  $a \in A_0$ , что  $x - a \in \mathbb{Q}$ ;
2. для любых различных  $a, b \in A_0$  величина  $a - b \notin \mathbb{Q}$ .

Хотя Шкляев и не упоминает этого, но для  $x \in \mathbb{Q} \cap (0; 1]$  можно заметить, что поскольку  $x, x - a \in \mathbb{Q}$ , то, следовательно, и  $a \in \mathbb{Q}$ . Таким образом, в множестве  $A_0$  есть хотя бы одно рациональное число. Из второго условия следует, что в множестве  $A_0$  не может быть двух рациональных чисел, поэтому в множестве  $A_0$  должно быть одно рациональное число. Неформально можно сказать, что одно рациональное число  $a$  из  $A_0$  обслуживает все рациональные числа  $x \in (0; 1]$ .

Для иррациональных чисел  $x \in (0; 1] \setminus \mathbb{Q}$  можно заметить, что множество  $A_0$  должно содержать бесконечное подмножество иррациональных чисел. Для обоснования этого можно, например, рассмотреть бесконечное множество  $B$  иррациональных чисел, которые являются квадратными корнями из рациональных чисел (неизвлекающиеся хорошо:  $\sqrt{1/2}$ ,  $\sqrt{1/3}$ ,  $\sqrt{1/5}$ ,  $\sqrt{1/6}$  и т.д.). Можно заметить, что разность любых двух различных иррациональных чисел такого вида тоже является иррациональным числом. Это можно показать от противного, допустим,  $\sqrt{1/2} - \sqrt{1/3} = a \in \mathbb{Q}$ . Тогда, берем правую и левую части и возводим их в квадрат  $1/2 - 2\sqrt{1/6} + 1/3 = a^2$ , откуда  $\sqrt{1/6} = (1/2 + 1/3 - a^2)/2 \in \mathbb{Q}$ . Тогда, отсюда следует, что число 6 является точным квадратом некоторого рационального числа, и можно представить  $\sqrt{6}$  в виде несократимой дроби  $m/n = \sqrt{6}$ , где  $m \in \mathbb{Z}$ , а  $n \in \mathbb{N}$ , откуда  $m^2/n^2 = 6$  или  $m^2 = 6n^2$ . Из последнего следует, что  $m^2$  должно делиться нацело на 6, но поскольку число 6 равно произведению двух простых множителей 2 и 3, то  $m^2$  должно делиться также на 2 и на 3, откуда следует, что  $m$  тоже должно делиться на 2 и на 3, и, таким образом,  $m$  должно делиться на 6. Тогда существует  $l \in \mathbb{Z}$ , такое что  $m = 6l$  и  $m^2 = 36l^2 = 6n^2$ , откуда  $6l^2 = n^2$ . Но из последнего следует, что  $n^2$  и следовательно,  $n$  делятся на 6, и получается, что дробь  $m/n$  можно сократить на 6, что противоречит сделанному допущению. Соответственно, в множестве  $A_0$  должен быть элемент  $a_2$ ,

такой что  $\sqrt{1/2} - a_2 \in \mathbb{Q}$ . Но для любого другого числа, например,  $\sqrt{1/3}$  должен быть элемент  $a_3$ , такой что  $\sqrt{1/3} - a_3 \in \mathbb{Q}$ . Можно показать, что  $a_2 \neq a_3$ , также используя метод от противного.

Допустим,  $\sqrt{1/2} - a_2 = b_2 \in \mathbb{Q}$  и  $\sqrt{1/3} - a_2 = b_3 \in \mathbb{Q}$ . Вычитая  $b_3$  из  $b_2$ , получаем  $b_2 - b_3 = \sqrt{1/2} - \sqrt{1/3} \in \mathbb{Q}$ , но выше было доказано, что  $\sqrt{1/2} - \sqrt{1/3} \notin \mathbb{Q}$ .  $a_2$  является иррациональным числом, так как  $\sqrt{1/2} = a_2 + b_2$ , а поскольку  $b_2 \in \mathbb{Q}$  и  $\sqrt{1/2} = a_2 + b_2 \notin \mathbb{Q}$ , то, следовательно,  $a_2 \notin \mathbb{Q}$ . Аналогично,  $a_3 \notin \mathbb{Q}$ . Таким образом, можно показать, что двум любым иррациональным числам  $x_1 \notin \mathbb{Q}$  и  $x_2 \notin \mathbb{Q}$ , таким что  $x_1 - x_2 \notin \mathbb{Q}$ , должны соответствовать разные числа  $a_1 \in A_0$  и  $a_2 \in A_0$ . Таким образом получаем, что подмножество иррациональных чисел, принадлежащих  $A_0$  должно быть бесконечным.

Закончив предложенное здесь обоснование того, что множество иррациональных чисел, принадлежащих  $A_0$ , должно быть бесконечным, можно возвратиться к выкладкам Шкляева. Шкляев предлагает далее пронумеровать все рациональные числа из интервала  $(0; 1)$  (последовательными натуральными числами) и сконструировать множества  $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$ , используя циклический сдвиг множества  $A_0$  на  $q_1, q_2, \dots, q_n, \dots$ , такой что элемент  $a \in A_0$  сдвигается в  $a + q$ , если  $a + q \leq 1$ , или в  $a + q - 1$ , если  $a + q > 1$  [16, с. 53]. Затем, Шкляев доказывает утверждение, что в случае  $i \neq j$  для множеств  $A_i$  и  $A_j$  выполняется  $A_i \cap A_j = \emptyset$ . Для доказательства Шкляев показывает, что предположение о существовании числа  $a \in A_i \cap A_j$  приводит к противоречию, поскольку тогда  $a_1 = a - q_i \in A_0$  и  $a_2 = a - q_j \in A_0$  (здесь имеется ввиду принадлежность в плане обратного циклического сдвига, т.е. если  $a - q_i \leq 0$ , то  $a_1 = a - q_i + 1$ , аналогично для  $a_2$  и  $q_j$ ). Если посмотреть разность  $a_1 - a_2 = q_j - q_i$  (возможно на единицу меньше или больше в случае перехода через границу), то эта разница оказывается рациональным числом, что противоречит второму условию для множества  $A_0$ . Кроме этого, Шкляев пытается доказать, что  $\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n = (0; 1]$ . При доказательстве Шкляев утверждает, что для любого  $x \in (0; 1]$  найдется такое  $q_n \in \mathbb{Q} \cap (0; 1)$ , что  $x - q_n \in A_0$ , а значит  $x \in A_n$  [16, с. 54]. Это утверждение напоминает первое условие на множество  $A_0$ , однако в первом условии на множество  $A_0$  нет явного указания на ограничение, что  $x - a \in (0; 1)$ , но если  $x > a$ , то это автоматически следует из того, что  $x, a \in (0; 1]$ . Однако, возможен случай что  $x = a$ , тогда утверждение Шкляева неверно, поскольку в этом случае  $x \in A_0$ . Также в первом условии на  $A_0$  возможен случай  $x < a$ , но, возможно, Шкляев здесь предполагает циклический сдвиг с добавлением едини-

цы, поскольку в этом случае  $x - a + 1 \in (0; 1)$ . Таким образом, доказательство Шкляева можно считать корректным, если сделать оговорку что  $x \notin A_0$ , и уточнить, что  $x - q_n \in A_0$ , когда  $x > q_n$ , и  $x - q_n + 1 \in A_0$ , когда  $x < q_n$ . В результате, по доказательству получится, что все  $x \in (0; 1] \setminus A_0$  будут принадлежать одному из множеств  $A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$ . Дополнительно здесь следует заметить (Шкляев этого не делает), что для любого  $i \in \mathbb{N}$  выполняется  $A_0 \cap A_i = \emptyset$  поскольку если существует  $a \in A_0 \cap A_i$ , то либо  $a - q_i \in A_0$  (когда  $a > q_i$ ), либо  $a - q_i + 1 \in A_0$  (когда  $a \leq q_i$ ), но, по второму условию, множеству  $A_0$  не может принадлежать два разных элемента отличающихся либо на рациональное число  $q_i$ , либо на рациональное число  $1 - q_i$ . Тогда  $(0; 1] \setminus \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = A_0$  и  $\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n = (0; 1]$ , причем  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$  являются семейством непересекающихся множеств.

**Замечание.** Для красоты определения можно добавить уточнение, что  $1 \in A_0$ , тогда  $q_i \in A_i$  для всех  $i \in \mathbb{N}$ .

Кроме этого, Шкляев предлагает представить, что у каждого подмножества  $A$  полуинтервала  $(0; 1]$  определена вероятность, причем так, что при циклическом сдвиге множества  $A$  на любое число  $b \in (0; 1)$  (т.е. элементы  $a$  из  $A$  переводятся в  $a + b$ , если  $a + b \leq 1$  и в  $a + b - 1$ , если  $a + b > 1$ ) вероятность множества не меняется. Затем Шкляев говорит, что обычная длина должна, казалось бы, удовлетворять этому свойству. Не совсем ясно, что имеет в виду Шкляев под обычной длиной, ведь обычная длина имеет смысл для непрерывных множеств, а рассмотренные выше множества  $A_0, A_1, \dots, A_i, \dots$  не являются непрерывными. Возможно, такой пассаж у Шкляева связан с тем, что множества  $A_0, A_1, \dots, A_i, \dots$  определяются у него после фразы про «обычную длину». Для множеств  $A_0, A_1, \dots, A_i, \dots$ , которые не являются непрерывными, вместо «обычной длины» можно было бы говорить про некую «меру множества» наподобие меры Лебега. Однако, по построению, то, что описано Шкляевым, напоминает множество Витали, как оно описано в русской Википедии, но, согласно книге Секея [12, с. 195], такое множество было построено Цермело.

Поскольку множества  $A_i$  не пересекаются, то Шкляев замечает, зачем-то меняя индекс  $i$  на  $n$ , что  $P(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n)$ . В дальнейшем тексте Шкляев возвращается к обозначению  $A_i$ , указывая что при этом все  $P(A_i)$  одинаковы, а значит в правой части стоит ряд из одинаковых чисел и такой ряд может сойтись только если  $P(A_i) = 0$ . Отсюда Шкляев делает вывод, что  $P(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n) = 0$ . Затем Шкляев опять возвращается к индексу  $n$ , указывая, что  $\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n = (0; 1]$ , но тогда вероятность  $P(\bigcup_{n=0}^{\infty} A_n) = 1$ , и Шкляев называет этот результат противоречием. На самом деле, чтобы действительно говорить о про-

тиворечии, надо также добавить, что  $P(A_0)$  равно нулю, как и все остальные  $P(A_i)$  и рассматривать вероятность объединения всех множеств с индексами от нуля до бесконечности, т.е.  $P(\bigcup_{i=0}^{\infty} A_i) = 1$ . Таким образом, нельзя построить непротиворечивую вероятностную меру на всех подмножествах  $(0; 1]$  с простым свойством однородности относительно сдвигов, и приходится выделять такие множества подмножеств элементарных событий, из которых исключены некоторые «нехорошие» подмножества.

При рассмотрении общего вероятностного пространства прежде всего вводится пространство элементарных исходов  $\Omega$ , представляющее собой некоторое множество, на которое не накладывается ограничений.

Необходимостью исключения «нехороших» подмножеств Шкляев мотивирует введение сигма-алгебры событий  $\mathcal{F}$ , которая представляет собой множество некоторых подмножеств пространства элементарных исходов  $\Omega$ , удовлетворяющее следующим условиям:

1.  $\Omega \in \mathcal{F}$ ;
2. Если  $F \in \mathcal{F}$ , то  $\bar{F} \in \mathcal{F}$ , где дополнение  $\bar{F}$  рассматривается до  $\Omega$ ;
3. Если  $F_1, \dots, F_n, \dots$  принадлежат  $\mathcal{F}$ , то множество

$$\bigcup_{n=1}^{\infty} F_n \in \mathcal{F}.$$

С использованием сигма-алгебры событий Шкляев дает определение вероятностной меры  $P$  [16, с. 52]: отображения из сигма-алгебры  $\mathcal{F}$  подмножеств пространства элементарных исходов  $\Omega$  в отрезок  $[0; 1]$ , которое удовлетворяет следующим свойствам:

1.  $P(\Omega) = 1$ ;
2. аддитивность:  $P(A + B) = P(A) + P(B)$  при любых непересекающихся  $A, B$  из  $\mathcal{F}$ ;
3. счетная аддитивность:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n + \dots) = \sum_{n=1}^{\infty} P(A_n),$$

где  $A_i$  – произвольные непересекающиеся множества, принадлежащие  $\mathcal{F}$ .

У Шкляева в последнем условии для вероятностной меры вместо «множества, принадлежащие  $\mathcal{F}$ », говорится «подмножества  $\mathcal{F}$ » [16, с.

52], что некорректно, поскольку  $A_i$  является элементом  $\mathcal{F}$ , а не подмножеством  $\mathcal{F}$ .

Можно заметить, что проблема с множествами Витали возникает только при попытке определить вероятностную меру как некую «длину», для которой допускается сдвиг множества на любое число  $b \in (0; 1)$  с сохранением вероятностной меры. Тот же Шкляев приводит пример вероятностной меры, корректно определенной на пространстве элементарных исходов  $\Omega = (0; 1]$  и множестве всех его подмножеств  $\mathcal{F} = 2^{(0;1]}$ , пример 8.1 [16, с. 52]. В этом примере Шкляев определяет вероятностную меру для любого множества  $A \in \mathcal{F}$ :  $P(A) = k/n$ , где  $k$  – число точек вида  $i/n$ ,  $i \in \{1, \dots, n\}$ , в множестве  $A$ . Шкляев показывает, что все условия, необходимые для вероятностной меры, при таком определении выполняются, и, следовательно, тройка  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  образует вероятностное пространство. Однако, сохранение вероятностной меры при сдвиге множества  $A$  на любое число  $b \in (0; 1)$  в общем случае не будет выполняться, здесь сохранение вероятностной меры происходит только при циклическом сдвиге на рациональные числа вида  $i/n$ , где  $i \in \{1, \dots, n\}$ . Таким образом, проблемы возникают только при сочетании некоторых сигма-алгебр  $\mathcal{F}$  с некоторыми способами определения вероятностной меры.

Ширяев [15], во избежание недоразумений, говорит про конечную аддитивность там, где Шкляев говорит просто про аддитивность. Кроме этого, Ширяев уточняет, что конечно-аддитивная мера  $\mu$  заданная на алгебре  $\mathcal{A}$  подмножеств множества  $\Omega$ , называется счетно-аддитивной ( $\sigma$ -аддитивной) или просто мерой, если для любых попарно непересекающихся множеств  $A_1, A_2, \dots$  из  $\mathcal{A}$  (*у Ширяева опечатка, вместо  $\mathcal{A}$  написано  $\Omega$* ) таких, что  $\sum_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$  [15, с. 163],

$$\mu\left(\sum_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n).$$

Далее, Ширяев говорит, что счетно-аддитивная мера  $P$  на алгебре  $\mathcal{A}$ , удовлетворяющая условию  $P(\Omega) = 1$ , называется вероятностной мерой или вероятностью (определенной на множествах алгебры  $\mathcal{A}$ ) [15, с. 164].

Можно заметить, что здесь Ширяев использует понятие просто алгебры  $\mathcal{A}$ , а не сигма-алгебры  $\mathcal{A}$ . Следует отметить, что Ширяев почему-то дает два разных определения алгебры, одно определение в первой главе, посвященной конечным пространствам  $\Omega$  элементарных событий [15, с. 28], и другое в второй главе, посвященной беско-

нечным пространствам  $\Omega$  элементарных событий [15, с. 162]. В первом определении, хотя Ширяев не оформил его словом «определение», Ширяев называет алгеброй такую систему  $\mathcal{A}$  подмножеств множества  $\Omega$ , что

1)  $\Omega \in \mathcal{A}$ ,

2) если  $A \in \mathcal{A}$ ,  $B \in \mathcal{A}$ , то множества  $A \cup B, A \cap B, A \setminus B$  также принадлежат  $\mathcal{A}$ .

Это определение алгебры практически совпадает с определением алгебры множеств у Колмогорова [11, с. 10], который называет алгеброй систему  $\mathcal{F}$  подмножеств множества  $\Omega$ , если  $\Omega \in \mathcal{F}$ , соединение, пересечение и разность двух множеств опять принадлежат системе  $\mathcal{F}$ . Отличие определений заключается в букве, которую использовали для обозначения алгебры (у Ширяева  $\mathcal{A}$ , у Колмогорова  $\mathcal{F}$ ), а также в том, что Колмогоров в определении вместо символических обозначений для операций с множествами использует словесные названия этих операций (соединение, пересечение и разность). Немного отличается у Колмогорова также название одной из операций: Колмогоров предпочитает говорить о соединении множеств, а Ширяев об объединении множеств. Далее, Колмогоров использует данное определение алгебры и для бесконечных пространств  $\Omega$  элементарных событий.

В то же время, Ширяев почему-то дает еще одно определение понятия алгебры для бесконечного пространства  $\Omega$  следующим образом [15, с. 162]:

Пусть  $\Omega$  – некоторое множество точек  $\omega$ . Система  $\mathcal{A}$  подмножеств  $\Omega$  называется алгеброй, если

a)  $\Omega \in \mathcal{A}$ ,

b)  $A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cup B \in \mathcal{A}, A \cap B \in \mathcal{A}$ ,

c)  $A \in \mathcal{A} \Rightarrow \overline{A} \in \mathcal{A}$ .

Ширяев отмечает, что в условии b) достаточно, чтобы выполнялось либо  $A \cup B \in \mathcal{A}$ , либо  $A \cap B \in \mathcal{A}$ , так как  $A \cup B = \overline{\overline{A} \cap \overline{B}}$ ,  $A \cap B = \overline{\overline{A \cup B}}$  [15, с. 162]. Отличие второго определения Ширяева от первого заключается в том, что в первом определении используется понятие разности множеств, а во втором определении используется понятие дополнения множества.

Можно посмотреть, являются ли эти определения по существу разными. Здесь можно отметить, что Колмогоров называет  $\overline{A}$  «дополнительным множеством» и определяет его через разность  $\Omega \setminus A$ , в то время как Ширяев предпочитает название «дополнение». Если исходить из первого определения, то поскольку  $\Omega \in \mathcal{A}$  и  $\Omega \setminus A \in \mathcal{A}$ , и, по определению,  $\overline{A} = \Omega \setminus A$ , то дополнение  $\overline{A} \in \mathcal{A}$ , таким образом, из пер-

вого определения следует второе. Если исходить из второго определения, то поскольку  $\bar{A} \in \mathcal{A}$ ,  $B \cap \bar{A} \in \mathcal{A}$  и  $B \setminus A = B \cap \bar{A}$ , то  $B \setminus A \in \mathcal{A}$ . Аналогично можно показать, что  $A \setminus B \in \mathcal{A}$ , и таким образом из второго определения следует первое. К сожалению, Ширяев не дает никаких пояснений о том, зачем ему понадобилось второе определение, отличающееся от определения Колмогорова.

Ширяев вводит также понятие сигма-алгебры, определяя ее как систему  $\mathcal{F}$  подмножеств  $\Omega$ , которая является алгеброй, и для которой выполняется дополнительное свойство:

Если  $A_n \in \mathcal{F}$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , то

$$\bigcup A_n \in \mathcal{F}, \quad \bigcap A_n \in \mathcal{F},$$

при этом достаточно, чтобы либо  $\bigcup A_n \in \mathcal{F}$ , либо  $\bigcap A_n \in \mathcal{F}$ .

Данное определение Ширяев дает как раз, переходя к рассмотрению вероятностных моделей, описывающих эксперименты типа бесконечного подбрасывания монеты [15, с. 161], которые как раз и соответствуют перколяционной модели, где пронумерованы ребра либо узлы. Ширяев также отмечает, что в данном случае приходится иметь дело с несчетным пространством  $\Omega$  [15, с. 162]. При этом, пространство  $\Omega$  определяется у Ширяева как

$$\Omega = \{\omega: \omega = (a_1, a_2, \dots), a_i = 0, 1\}.$$

Ширяев, отмечая, что всякое число  $a \in [0; 1)$  можно однозначно разложить в содержащую бесконечное число нулей двоичную дробь, в виде

$$a = \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{2^2} + \dots \quad (a_i = 0, 1),$$

делает вывод, что между точками  $\omega$  пространства  $\Omega$  может быть установлено взаимно однозначное соответствие и, значит, мощность множества  $\Omega$  равна мощности континуума. Упоминание о бесконечном количестве нулей в двоичной дроби, по-видимому, связано с тем, что для действительного числа  $a \in [0; 1)$ , в котором содержится конечное число нулей, начиная с некоторого разряда  $a_n$  все цифры будут единицами (последний нулевой разряд  $a_{n-1}$ ), а такие действительные числа, с точки зрения разложения в геометрическую прогрессию, считаются эквивалентными числам, в которых разряд  $a_{n-1}$  заменен на единицу,

все следующие разряды, начиная с  $a_n$ , заменены нулем, а разряды перед  $a_{n-1}$  такие же. Например, число  $0,0(1)$  считается эквивалентным числу  $0,1(0)$ . Однако, с точки зрения событий  $\omega_1 = (0, 1, 1, \dots)$  и  $\omega_2 = (1, 0, 0, \dots)$  это существенно разные события, в одном из которых почти всегда выпадала единица, а в другом почти всегда выпадал ноль. Возможно, Ширяев просто пренебрегает этим отличием  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , поскольку множество событий

$$\Omega_2 = \{\omega: \omega = (a_1, a_2, \dots), a_i = 0, 1; \text{ количество } a_i = 1 \text{ конечно}\}$$

однозначно соответствуют некоторому бесконечному подмножеству рациональных чисел, и таким образом счетно, а каждому элементарному событию  $\omega_2 \in \Omega_2$  можно поставить взаимно однозначное соответствие элементарное событие  $\omega_1 \in \Omega_1$ , где

$$\Omega_1 = \{\omega: \omega = (a_1, a_2, \dots), a_i = 0, 1; \text{ количество } a_i = 0 \text{ конечно}\}$$

и, таким образом, множество  $\Omega_1$  тоже счетно. В тоже время, в теории множеств известна теорема, что объединение бесконечного множества  $A$  со счетным множеством  $B$  имеет такую же мощность что и множество  $A$  [5, с. 16-17], поэтому  $[0; 1) \cup \Omega_1$  равномощно  $[0; 1)$ .

Вероятностным пространством называется тройка  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$ , состоящая из пространства элементарных исходов  $\Omega$ , определенной на множестве  $\Omega$  сигма-алгебры событий  $\mathcal{F}$ , и определенной для сигма-алгебры  $\mathcal{F}$  вероятностной меры  $P$  [16, с. 52]. Аналогичное определение вероятностного пространства как тройки  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  есть и у Ширяева [15, с. 166]. Однако, Ширяев вводит также понятие измеримого пространства, которое представляет собой пару  $(\Omega, \mathcal{F})$ , где  $\Omega$  – некоторое пространство, а  $\mathcal{F}$  – сигма-алгебра его подмножеств [15, с. 163].

Некоторая странность определения у Ширяева заключается в том, что в определении вероятностной меры (вероятности) Ширяев говорит о счетно-аддитивной мере  $P$  на алгебре  $\mathcal{A}$ , удовлетворяющая условию  $P(\Omega) = 1$ , т.е. не требует, чтобы алгебра  $\mathcal{A}$  обязательно была сигма-алгеброй [15, с. 164]. Возможно, у Ширяева просто пропущено в определении вероятности, что алгебра  $\mathcal{A}$  является сигма-алгеброй, либо Ширяев допускает рассмотрение вероятностей не на сигма-алгебре, но конкретных примеров такого рассмотрения вероятности не приводит.

В целом, у Ширяева многие моменты изложены несколько подробнее. В частности, Ширяев говорит о «богатстве» сигма-алгебр, определенных на пространстве  $\Omega$  элементарных событий, отмечая, что  $\mathcal{F}_* = \{\emptyset, \Omega\}$  и  $\mathcal{F}^* = \{A: A \subseteq \Omega\}$  являются и алгебрами, и сигма-

алгебрами, причем  $\mathcal{F}_*$  самая «бедная» сигма-алгебра, а  $\mathcal{F}^*$  – самая «богатая» сигма-алгебра [15, с. 171]. Также Ширяев вводит понятие алгебры, порожденной множеством  $A \subseteq \Omega$ , определяя такую алгебру как систему множеств:

$$\mathcal{F}_A = \{A, \bar{A}, \emptyset, \Omega\}$$

и отмечает, что данная алгебра является также сигма-алгеброй [15, с. 171]. Здесь не совсем ясно, зачем Ширяев говорит о сигма-алгебре, ведь понятие сигма-алгебры актуально в случае, когда система рассматриваемых в алгебре множеств является бесконечной, а в алгебре  $\mathcal{F}_A$  всего четыре множества. Далее Ширяев рассматривает системы множеств, порождаемые счетными разбиениями пространства элементарных событий  $\Omega$  на непустые множества. Для разбиения Ширяев вводит обозначение

$$\mathcal{D} = \{D_1, D_2, \dots\},$$

где  $\Omega = D_1 + D_2 + \dots$  и  $D_i \cap D_j = \emptyset, i \neq j$ . Система  $\mathcal{A} = \alpha(\mathcal{D})$ , образованная из множеств, являющихся объединением конечного или счетного числа элементов разбиения (с присоединенным пустым множеством), является алгеброй (и сигма-алгеброй). Также Ширяев приводит лемму, согласно которой для любых множеств  $\mathcal{E}$  из  $\Omega$  существуют наименьшая алгебра, обозначаемая  $\alpha(\mathcal{E})$ , и наименьшая сигма-алгебра, обозначаемая  $\sigma(\mathcal{E})$ , содержащие все множества из  $\mathcal{E}$  [15, с. 171]. Соответственно, систему  $\alpha(\mathcal{E})$  (или  $\sigma(\mathcal{E})$ ) называют (наименьшей) алгеброй (сигма-алгеброй), порожденной системой множеств  $\mathcal{E}$ .

Для установления того, что заданная система множеств является сигма-алгеброй Ширяев вводит понятие монотонного класса. Система  $\mathcal{M}$  подмножеств  $\Omega$  называется монотонным классом, если из того, что  $A_n \in \mathcal{M}, n = 1, 2, \dots$ , и  $A_n \uparrow A$  или  $A_n \downarrow A$ , следует, что  $A \in \mathcal{M}$  [15, с. 172]. Здесь  $A_n \uparrow A$  означает, что  $A_1 \subseteq A_2 \subseteq \dots$ ;  $A_n \uparrow A$  означает, что  $A_n \uparrow$  и  $\cup A_n = A$ . В свою очередь,  $A_n \downarrow A$  означает, что  $A_1 \supseteq A_2 \supseteq \dots$ ;  $A_n \downarrow A$  означает, что  $A_n \downarrow$  и  $\cap A_n = A$  [15, с. 519].

Далее Ширяев формулирует лемму [15, с. 172], согласно которой, для того чтобы алгебра  $\mathcal{A}$  была в то же время и сигма-алгеброй, необходимо и достаточно, чтобы эта алгебра была монотонным классом. Также, Ширяев вводит обозначение для наименьшего монотонного класса  $\mu(\mathcal{E})$ , содержащего систему множеств  $\mathcal{E}$ , но к сожалению не дает определения, какой монотонный класс называется наименьшим. Данный пробел восполняется в литературе по теории вероятностей,

например, определение наименьшего монотонного класса встречается в сборнике задач у Дороговцева и др. [14, с. 8]. Согласно определению в данном сборнике задач, если  $K$  является некоторым классом подмножеств  $\Omega$ , то наименьший монотонный класс  $M_0(K)$  – это монотонный класс, для которого каждое множество из  $K$  принадлежит  $M_0(K)$  и какой бы ни был монотонный класс  $M$ , содержащий  $K$ ,

$$M_0(K) \subset M.$$

В обозначениях у Ширияева [15] по сравнению с Дороговцевым и др. [14], имеются небольшие отличия: в [15] используется для нестрого включения знак « $\subseteq$ », в то время как в [14] используют для нестрого включения знак « $\subset$ ». Также в формулировках в [15] и в [14] есть небольшое отличие: в [15, с. 171] говорится о системе множеств  $\mathcal{E}$ , а в [14, с. 8] говорится о классе множеств  $K$ . По-видимому, Ширияев употребляет фразы «система множеств» и «класс множеств» как синонимы, поскольку, например, Ширияев сначала говорит о системе подмножеств  $\mathcal{F}^* = \{A: A \subseteq \Omega\}$ , а затем говорит о той же системе подмножеств  $\mathcal{F}^*$  как о классе всех подмножеств пространства  $\Omega$  [15, с. 171]. Аналогично у Дороговцева и др. фразы «система подмножеств» и «класс подмножеств» используются как синонимы, например, в задании I.1.26 говорится о классе подмножеств, а в задании I.1.27 в аналогичной ситуации говорится о системе подмножеств [14, с. 7].

Также Ширияев доказывает теорему о том, что для любой алгебры  $\mathcal{A}$  выполняется

$$\mu(\mathcal{A}) = \sigma(\mathcal{A}),$$

т.е. наименьший монотонный класс и наименьшая сигма-алгебра, включающие алгебру  $\mathcal{A}$  совпадают. Далее Ширияев дает определение  $\pi$ -систем и  $\lambda$ -систем множеств [15, с. 175]. Согласно Ширияеву, система  $\mathcal{P}$  подмножеств  $\Omega$  называется  $\pi$ -системой, если она замкнута относительно взятия конечных пересечений: если  $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{P}$ , то  $\bigcap_{1 \leq k \leq n} A_k \in \mathcal{P}$ ,  $n \geq 1$ , а система  $\mathcal{L}$  подмножеств  $\Omega$  называется  $\lambda$ -системой, если

- a)  $\Omega \in \mathcal{L}$ ,
- b)  $(A, B \in \mathcal{L} \text{ и } A \subseteq B) \Rightarrow (B \setminus A \in \mathcal{L})$ ,
- c)  $(A_n \in \mathcal{L}, n \geq 1, \text{ и } A_n \uparrow A) \Rightarrow (A \in \mathcal{L})$ .

Ширияев также отмечает, что в определении  $\lambda$ -системы можно заменить пару условий b) и c) на другую пару условий:

- d) если  $A \in \mathcal{L}$ , то  $\bar{A} \in \mathcal{L}$ ,

е) если  $A_n \in \mathcal{L}, n \geq 1, A_n \cap A_m = \emptyset$  для  $m \neq n$ , то  $\bigcap A_n \in \mathcal{L}$ .

Здесь можно заметить, что Ширяев злоупотребляет обозначением  $A_n$ . В свойстве с) записано, что  $A_n \in \mathcal{L}, n \geq 1$ . По-видимому, запись  $n \geq 1$  следует читать как запись, сделанную в определении сигма-алгебры,  $n = 1, 2, \dots$  Однако, остается вопрос, что означает запись  $A_n$ ? Вероятно, такое злоупотребление записью характерно для литературы по теории вероятностей, поскольку подобные записи встречаются и в [14], например, в определении сигма-алгебры [14, с. 3]. К счастью, у Дороговцева и др. кое-где встречаются расшифровки, поясняющие обозначение  $A_n$ . Например, в задаче I.1.6 написано «пусть  $A_n$  – последовательность множеств» [14, с. 4]. В других задачах встречаются другие пояснения. Так в задаче I.1.10 встречается пояснение «пусть  $\{A_n\}$  – некоторая последовательность подмножеств  $\Omega$ » [14, с. 5]. Здесь  $A_n$  взято в фигурные скобки, которые подчеркивают, что речь идет не об одном элементе из последовательности, а обо всей последовательности и кроме того, в пояснении уточняется, что  $A_n$  является подмножеством  $\Omega$ . Уточнение о принадлежности  $A_n$  множеству  $\Omega$  в большинстве случаев опускается, но, по-видимому, неявно подразумевается. К сожалению, Дороговцев и др. тоже в большинстве случаев пренебрегают употреблением фигурных скобок и уже в задачах I.1.12 и I.1.13 пишут «пусть  $A_n (n = 1, 2, \dots)$  – последовательность подмножеств  $\Omega$ ». В тоже время, когда в [14] употребляется запись  $\{A_n\}$ , то почему-то не уточняется, какие значения может принимать  $n$ , хотя такое уточнение разумно и при использовании фигурных скобок. Запись  $n = 1, 2, \dots$  означает, что  $n$  принимает значения, являющиеся последовательными натуральными числами, и многоточие в конце означает, что используется сколь угодно большие натуральные числа, т.е. последовательность  $\{A_n\}$  является бесконечной последовательностью множеств, пронумерованных натуральными числами, причем для любого значения  $n$  выполняется  $A_n \subseteq \Omega$ . Из того, что элементы бесконечной последовательности множеств пронумерованы натуральными числами, следует что эта последовательность  $\{A_n\}$  сама является счетным множеством. В последней фразе как раз видно, насколько важно употребление фигурных скобок, когда речь идет о всей последовательности, чтобы отличать это от случая, когда речь идет об элементе последовательности, который в свою очередь является множеством, поскольку элемент последовательности множеств в свою очередь может быть счетным множеством. У Шкляева в свою очередь, встречается очень интересный вариант записи « $A_1, \dots, A_n, \dots$  принадлежат  $\mathcal{A}$ » [16, с. 53], который означает, что рассматривается бесконечная последовательность множеств  $\{A_1, \dots, A_n, \dots\}$  и каждый элемент этой последовательности,

обобщенно обозначаемый  $A_n$ , принадлежит  $\mathcal{A}$ . Запись Шкляева, по существу, близка к записи Дороговцева и др. « $A_n (n = 1, 2, \dots)$  – последовательность подмножеств  $\Omega$ » [14, с. 5], где Дороговцев и др. также вводят обобщенное обозначение члена бесконечной последовательности  $A_n$ , при этом явно употребляется слово «последовательность», а ее бесконечность подчеркивается заданием правила для индекса  $n$ , который является обобщенным обозначением элемента бесконечной последовательности  $\{1, 2, \dots\}$ . Более корректной записью, по сравнению с записью « $n = 1, 2, \dots$ », была бы запись « $n \in \{1, 2, \dots\}$ ». Последняя запись является более корректной, поскольку она подчеркивает, что запятую, которая стоит после единицы, не следует рассматривать как завершение формулы  $n = 1$ . Если посмотреть определение сигмалгебры в [14, с. 3], то можно увидеть запись « $A_n \in F (n = 1, 2, \dots)$ », напоминающую запись в пункте с) у Ширяева [15, с. 175]. Соответствующую запись у Дороговцева и др. следует читать как «рассматривается бесконечная последовательность множеств  $\{A_n\}$ , где  $n \in \{1, 2, \dots\}$ , и каждый элемент этой последовательности, обобщенно обозначаемый  $A_n$ , принадлежит  $F$ ». Соответственно, запись Ширяева « $A_n \in \mathcal{L}, n \geq 1$ », по-видимому, следует читать аналогично: «рассматривается бесконечная последовательность множеств  $\{A_n\}$ , где  $n \in \{1, 2, \dots\}$ , и каждый элемент этой последовательности, обобщенно обозначаемый  $A_n$ , принадлежит  $\mathcal{L}$ ». Далее в формулировке свойства с) у Ширяева встречается запись  $A_n \uparrow A$ , которая означает, что рассматривается монотонная последовательность множеств  $A_1 \subseteq A_2 \subseteq \dots$ ,  $\cup A_n = A$ .

Однако, в пункте е) Ширяев еще больше злоупотребляет обозначениями, записывая « $A_n \in \mathcal{L}, n \geq 1, A_n \cap A_m = \emptyset$  для  $m \neq n$ ». Первая часть этой записи « $A_n \in \mathcal{L}, n \geq 1$ » была расшифрована выше, но возникает вопрос что означает вторая часть записи « $A_n \cap A_m = \emptyset$  для  $m \neq n$ »? Наибольшую странность в этой записи имеет способ задания  $m$ , для которого сказано только, что  $m$  не равно  $n$ . Если расшифровать вторую часть записи, то, по-видимому, ее следует читать как «для любых  $m, n \in \{1, 2, \dots\}$ , когда  $m \neq n$  выполняется  $A_n \cap A_m = \emptyset$ ».

### Список литературы:

1. Grimmett G. Percolation / G. Grimmett. – 2. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Singapore; Tokyo: Springer, 1999. ISBN 3-540-64902-6.
2. Sahimi M. Applications of Percolation Theory / M. Sahimi. – 2nd ed. – Cham, Switzerland: Springer Nature, 2023. ISBN 978-3-031-20386-2.

3. Stauffer D. and Aharony A. Introduction to Percolation Theory, 2nd ed.— London: Taylor & Francis, 1992. 191 p.
4. Tarasevich Y. Y. et al. Identification of current-carrying part of a random resistor network: Electrical approaches vs. graph theory algorithms // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 955. Article 012021. 7 p.
5. Верещагин Н. К., Шень А. Лекции по математической логике и теории алгоритмов. Часть 1. Начала теории множеств. — 4-е изд., доп. — М.: МЦНМО, 2012. — 112 с. ISBN 978-5-4439-0012-4.
6. Гордеев И. И. и др. Исправление алгоритма заливки для нахождения геометрического остова в задачах перколяции узлов на квадратных решетках // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2023. — № 4(64). — С. 97-117.
7. Гордеев И. И., Овчаренко С. С., Сизова А. А. Нахождение проводящего остова в двумерной решетке методом заливки // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2020. — № 1(49). — С. 94-111.
8. Гордеев И. И., Саенко Н. С. Анализ недостатков алгоритма Грассбергера для поиска перколяционного остова на квадратной решетке и возможности его распараллеливания // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности : Материалы I Международной научно-практической конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 20–25 марта 2021 года. — Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2021. — С. 12-14.
9. Гордеев И. И., Саенко Н. С. Сравнение алгоритмов Грассбергера и Ахунжанова для нахождения остова перколяционного кластера в задачах перколяции узлов на квадратной решетке // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2022. — № 3(59). — С. 44-60.
10. Кестен Х. Теория просачивания для математиков. Пер. с англ.— М.: Мир, 1986. — 392 с., ил.
11. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. Изд. стереотип. М.: ЛЕНАНД, 2024. — 120 с.
12. Секей Г. Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике: Пер. с англ. — М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2019. 272 с. ISBN 978-5-4344-0739-7.
13. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: Учебное пособие. — М.: Едиториал УРСС, 2002.
14. Теория вероятностей. Сборник задач: Пер. с укр. / Под общ. ред. чл.-кор. АН УССР А. В. Скорохода.— Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1980.—432 с.
15. Ширяев А. Н. Вероятность. В 2-х кн. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: МЦНМО, 2004. Кн. 1. — 520 с. — ISBN 5-94057-105-0.
16. Шкляев А. В. Теория вероятностей. Семинары. Мехмат МГУ // teach-in.ru. URL: <https://teach-in.ru/file/methodical/pdf/probability-theory-seminars-shklyayev-M.pdf> (дата обращения: 19.12.2024).

## ҚАЗАҚ ТІЛІНДЕГІ КОНФЕРЕНЦИЯ БАЯНДАМАЛАРЫ

### ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР

#### 1-БӨЛІМ

#### «ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР»

### 1.1. АСПАПТАР, МЕТРОЛОГИЯ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫ МЕН ЖҮЙЕЛЕРІ

#### BIOENGINEERING: A REVOLUTION IN SCIENCE

*Askar Zhuldyz*

*Student,*

*Almaty College of Transport and Communications,*

*Kazakhstan, Almaty*

#### БИОИНЖЕНЕРИЯ: ҒЫЛЫМДАҒЫ РЕВОЛЮЦИЯ

*Асқар Жұлдыз*

*студент,*

*Алматы көлік және коммуникациялар колледжі,*

*Қазақстан Республикасы, Алматы*

## БИОИНЖЕНЕРИЯ: РЕВОЛЮЦИЯ В НАУКЕ

**Аскар Жұлдыз**

студент,

Алматинский колледж транспорта и коммуникаций,  
Казахстан, г. Алматы

**Abstract.** This article explores bioengineering, a field of science that emerged at the intersection of biology and engineering. Its goal is to study living organisms and modify their properties to solve various problems. This field includes genetic modification, biosynthesis, cell therapy, and the creation of biomaterials, which have led to significant breakthroughs in healthcare, agriculture, and ecology. These technologies offer humanity new opportunities, such as treating severe diseases, increasing productivity, and protecting the environment. However, they also raise ethical questions.

**Түйіндеме.** Бұл мақалада биоинженерия – биология мен инженерияның тоғысында пайда болған ғылым саласы ретінде, тірі ағзаларды зерттеу және олардың қасиеттерін өзгерту арқылы әр түрлі мәселелерді шешу жолдары қаралды. Бұл сала генетикалық модификация, биосинтез, жасушалық терапия және биоматериалдарды жасаумен айналысады. Соңғы жылдары биоинженерия денсаулық сақтау, ауыл шаруашылығы және экологияда үлкен серпіліс жасады. Бұл технологиялар адамзатқа ауыр ауруларды емдеу, өнімділікті арттыру және қоршаған ортаны қорғау сияқты жаға мүмкіндіктер береді, бірақ олармен бірге этикалық мәселелер туындауда.

**Аннотация.** В этой статье рассматривается биоинженерия – область науки, возникшая на стыке биологии и инженерии, цель которой состоит в изучении живых организмов и изменении их свойств для решения различных задач. Эта область включает генетическую модификацию, биосинтез, клеточную терапию и создание биоматериалов, которые произвели большой прорыв в здравоохранении, сельском хозяйстве и экологии. Эти технологии представляют человечеству новые возможности, такие как лечение тяжелых заболеваний, повышение производительности и защита окружающей среды, однако вместе с этим возникают и этические вопросы.

**Keywords:** Stem cells, neural networks, artificial intelligence, bioengineering, genetic engineering, bio hybrid technologies.

**Түйінді сөздер:** дің жасушалары, нейрондық желілер, жасанды интеллект, биоинженерия, генетикалық инженерия, биогибридтік технологиялар.

**Ключевое слово:** Стволовые клетки, нейронные сети, искусственный интеллект, биоинженерия, генетическая инженерия, биогибридные технологии.

Биоинженерия – тірі организмдерді зерттеп, оларын құрылымдарын, функцияларын және генетикалық құрамдарын өзгерту арқылы адамзатқа пайдасын тигізетін жаңа технологияларды дамытатын ғылым саласы. Бұл сала биология, химия, физика және инженерия сияқты әртүрлі ғылымдарды біріктіріп, тіршілік құбылыстарын қолданбалы түрде зерттейді.

Биоинженерия қазіргі таңда ғылым мен медицинадағы ең үлкен революциялық жаңалықтардың біріне айналууда. Биоинженерия генетикалық өңдеуден бастап, жасушаларды қайта қалпына келтіруге, жасанды ағзаларды жасауға дейінгі кең ауқымды саланы қамтиды. Оның жетістіктері адам өмірін жақсартуға, ауыр ауруларды емдеуге, экологиялық мәселелерді шешуге және азық – түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етуге үлкен мүмкіндік береді.

Биоинженерияның басты мақсаттарының бірі – аурулады емдеу және денсаулық сақтауды жақсарту. Бұл сала генетикалық ауруларды емдеп бастап, жасанды ағзаларды құрастыруға дейінгі ауқымды мәселелерді шешуге көмектеседі. Гендік инженерияның арқасында ғалымдар қатерлі ісіктерді емдеудің жаңа әдістерін зерттеп, адам ағзасындағы генетикалық ақауларды түзетуге мүмкіндік алып жатыр.

Қолдану мүмкіндіктері:

1. Медицинада: Биоинженерия арқылы дәрілердің жаңа түрлері, гендік терапия және трансплатацияға арналған жасанды ағзалар жасалуда. Көптеген аурулардың, соның ішінде қатерлі ісіктің де тиімді емдеу әдістері табылуды.

2. Ауыл шаруашылығында: Генетикалық модификацияланған өсімдіктер мен жануарлар өндірісі өнімділікті арттыруға, зиянкестерге төзімділікті күшейтуге көмектеседі.

3. Экологияда: Биоинженерия табиғатқа зиян келтіретін қалдықтарды биологиялық жолмен ыдыратуға, ауаны және суды тазартуға ықпал етеді.

Революциялық тың жаңалықтарда болып жатқан, бірі адамның дің жасушаларын миы бар робот жасау үшін қолдану өте күрделі және қазіргі технологиялық деңгейде шындыққа сай келмейді. Бірақ ғылымда кейбір жетістіктер бар, олар бұл идеяға жақындау үшін маңызды қадамдар болуы мүмкін.

Дің жасушалары – адам ағзасындағы кез келген жасуша түріне айнала алатын ерекше жасушалар түріне айнала алатын ереше

жасушалар. Олар, әсіресе, медициналық мақсаттарда, яғни зақымдалған тіндерді қалпына келтіруде және ауруларды емдеуде қолданылады. Мидың жасушаларын лабораторияда өсіру мүмкін болғанымен, олар «ақылды» роботқа қосу – әлі де болса ғылым фантастикасының деңгейінде.

Ми функциялары күрделі нейрондық желілерге, электромагниттік және химиялық сигналдарға негізделген. Әзірге, миға ұқсас жасанды интеллект немесе компьютерлік жүйелер жасауда айтарлықтай жетістікке жеткенімізбен, олардың ешқайсысы адамның миы сияқты ойлау, сезіну, бейімделу сияқты қабілеттерге ие емес. Сонымен қатар, тірі жасушаларды робот жүйесімен біріктіру де биология мен инженерияның күрделі мәселелерін тудырады, өйткені тірі тіндер мен механикалық құрылғыларды үйлесімді жұмыс істетуге қиын.

Алайда ғалымдар «биогибридті» жүйелер жасау жолында ізденіп жатыр. Мысалы, кішкентай роботтарға арнайы өсірілген нейрондарды қосуды зерттеу тәжірибелері бар, бірақ бұл әзірге эксперименттік деңгейде. Келешекте нейробиология мен робототехниканың дамуы нәтижесінде биологиялық материалдарды қолданатын интеллектуалды роботтар құру мүмкіндігі болуы ықтимал. Сонымен, дің жасушаларынан «миы бар робот» жасау ғылымның қазіргі жағдайында мүмкін емес, бірақ болашақта биология, нейроғылым және робототехниканың бірігуі арқылы осындай идеяларды іске асыруға жақындауымыз ықтимал.

Жасуша синтезі мен роботтар екуі де заманауи ғылымдағы маңызды бағыттар, бірақ олар әртүрлі мақсаттар үшін қызмет етеді. Жасуша синтезі биомедицинада маңызды рөл атқарады. Ол арқылы ғалымдар адамның ағзасын құрайтын жасушаларды зерттеп, оларды қалпына келтіру, емдеу және ауруларды зерттеу үшін қолданады. Жасуша синтезінің басты артықшылықтары мыналар:

1. Медицинада емдеу әдістерін дамыту: Жасуша синтезі арқылы жасалған жасушалар науқастардың зақымдалған тіндерін қалпына келтіруде, генетикалық ауруларды түзетуде және түрлі ауруларды емдеуде қолданылады. Мысалы, жүрек ауруларын, қант диабетін емдеуге арналған жасушалық терапиялар әзірленуде.

2. Ағзаларды трансплантациялау: Дің жасушаларын қолдану арқылы зертханалық жағдайда әртүрлі тіндер мен мүшелерді өсіру мүмкіндігі бар. Бұл орган жетіспеушілігі проблемасын шешуге, ағзаларды трансплантациялауға қажетті уақытты қысқартуға көмектеседі.

3. Зерттеулер және дәрі – дәрмек сынақтары: Жасушаларды лабораторияда жасау арқылы жаңа дәрілерді сынақтан өткізу, олардың

ағзаға әсерін зерттеу жеңілдейді. Жасушалар арқылы дәрі – дәрмектің тиімділігін тексеріп, жанам әсерлерін анықтауға болады.

Ал, роботтар мүлде басқа басқа мақсатта жұмыс істейді. Олардың қызметі көбіне өндірістік, тұрмыстық және зерттеу міндеттерін атқаруға бағытталған. Роботтар механикалық жүйе ретінде жұмыс істейді, олардың жасанды интеллекті барі бірақ олар биологиялық материалдарға тәуелді емес және тірі ағзалар секілді жасушаларға мұқтаж емес. Сонымен, жасуша синтезі және роботтар – әртүрлі салаларда қажеттіліктерді шешетін технологиялар. Жасуша синтезі медицина мен биологияны дамыту үшін қажет болса, роботтар өндірісті автоматтандыру, күрделі есептеулерді орындау және адамдарға физикалық көмектесу үшін қолданылады.

Ғылым мен технологиядағы даму болашағы өте қызықты әрі бллашағы зор бағыттарда жүріп жатыр. Төменде бірнеше маңызды салалардағы даму болашағына тоқталсақ:

1. Жасанды интеллект (AI) және робототехника: Жасанды интеллект дамыған сайын, олар адамдардың өмірін жақсартуға және түрлі салаларды автоматтандыруға көмектеседі. AI медицинада ауруларды анықтауда, қаржы секторында болжамдар жасау, білім беру және тіпті шығармашылық салаларда қолданылады. Болашақта роботтар адамдардың қиын, қауіпті жұмыстарын атқарады, әрі AI адамның әрекеттерін болжау, үйрену қабілетімен жақсара түседі.

2. Генетикалық инженерия және медицина: Генетикалық инженерия адамның генетикалық кодын өңдеуге мүмкіндік беріп, тұқым қуалайтын аурулардан алдын ала қорғану, қатерлі ісік пен басқа да күрделі ауруларды емдеуге көмектеседі. CRISPR сияқты геномды редакциялау технологиялары арқылы ғалымдар генетикалық ауруларды түсезітіп, генетикалық ауруларды болдырмауға мүмкіндік алады. Болашақта медицина дің жасушалары мен генетикалық инженерия арқылы жеке тұлғаларға арнайы емдеу әдістерін жасауға бағытталады.

3. Жасуша және тін инженериясы: Дің жасушалары мен тін инженериясы тірі тіндер мен ағзаларды жасау мүмкіндігін береді. Бұл орган жетіспеушілігі мәселесін шешуге көмектеседі, әрі адамның өз денесінен алынған жасушалардан жасалған ағзалар дене тарапынан жақсы қабылданады. Болашақта зертханалық жағдайда өсірілген жүрек, бүйрек сияқты мүшелер трансплантацияда кеңінен қолданылуы мүмкін.

4. Жаңартылатын энергия және экологиялық технологиялар: Климаттың өзгеруі және энергияға сұраныстың артуы экологиялық технологиялар мен жаңартылатын энергия көздерін дамытуды талап

етеді. Күн, жел, су және биоэнергия сияқты энергия көздеріне көшу, көмірқышқыл газын ұстайтын технологиялар, пластик қалдықтарын өңдеу және қоршаған ортаны қорғау салалары дамудың басты бағыттарына айналады.

5. Кванттық есептеулер: Кванттық есептеулер қазіргі компьютерлерге қарағанда мыңдаған есе қуатты есептеулер жасауға мүмкіндік береді. Олар өте үлкен деректерді өңдеуде, химияда жаңа материалдар жасауда, медицинада дәрі дәрілерді зерттеуде және қаржыда күрделі модельдерді есептеуде қолданылады. Бұл сала әлі дамып келе жатқанымен, болашақта оның әлеуеті жоғары.

6. Космосты зерттеу және колонизация: Космосты зерттеу қарқын алуда, ал болашақта басқа планеталарда адам өмірін қамтамасыз ету жобалары іскеасырылуы мүмкін. Ай мен Марста базалар салу, ғарышта өмір сүру мүмкіндіктерін зерттеу, әрі ғарыштық ресурстарды пайдалану идеялары осы бағытта қарастырылуда.

7. Биогибридтік технологиялар: Биогибридтік технологиялар биологиялық жасушалар мен жасанды жүйелерді біріктіруге тырысады. Бұл тірі жасушаларды қолдана отырып, интеллектуалды роботтар жасау, тірі тіндерден жасалған құрылғылар жасау саласын дамытуы мүмкін. Болашақта бұл технологилар тірі организмдер мен жасанды интеллект арасындағы байланысты күшейтуі ықтимал.

Дамудың болашағы адамзаттың денсаулығын жақсартуға, қоршаған ортаны қорғауға, жағартылатын ресурстарды пайдалануға, әрі өмір сапасын арттыруға бағытталған. Сонымен қатар, ғылыми – техникалық прогрестің адам өміріне ықпалы кеңейіп, жаңа сұрақтар мен мәселелерді туындатуы мүмкін. Бірақ мұндай жетістіктер ғылым мен технологияның этикасын сақтау отырып, адамзат игілігі үшін қолданылған жағдайда ғана бізге пайда әкеледі.

Болашағы: Биоинженерия болашақта өмір сапасын жақсартуға, экологиялық және азық – түлік қауіпсіздігін қамтамасыз етуге үлкен үлес қосады. Ғалымдар жасанды ағзалар жасап, адам денесінің зақымдалған немесе жоғалған мүшелерін қалпына келтіруді жоспарлап отыр. Сонымен қатар, климаттың өзгеруі және азық – түлік жетіспеушілігі сияқты мәселелерді шешуде де биоинженерияның рөлі маңызды.

### **Әдебиеттер:**

1. А.Ю.Панчин «Сумма биотехнологии». Библиотека фонда «Эволюция» 2022г.
2. Қ.Ж.Сыман «Биотехнология негіздері» Альманахъ баспасы, 2019 ж.

3. Р.Шмид «Наглядная биотехнология и генетическая инженерия». Лаборатория знаний. 2019г.
4. М.Нетесова, В.Швидченко «Биотехнология размножения плодовых и ягодных культур». Учебное пособие. Фолиант баспасы. 2010 ж.
5. Дж. Бейли, Д.Оллис «Основы биохимической инженерии». Издательство «Мир».

*ДЛЯ ЗАМЕТОК*

**НАУЧНЫЙ ФОРУМ:  
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

*Сборник статей по материалам LXXXIII международной  
научно-практической конференции*

№ 4 (84)  
Апрель 2025 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 07.04.25. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 6,75. Тираж 550 экз.

Издательство «МЦНО»  
123098, г. Москва, ул. Маршала Василевского, дом 5, корпус 1, к. 74  
E-mail: tech@nauchforum.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного  
оригинал-макета в типографии «Allprint»  
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 1



**НАУЧНЫЙ  
ФОРУМ**  
nauchforum.ru