



НАУЧНЫЙ  
ФОРУМ  
nauchforum.ru

ISSN: 2541-8394



№12(80)

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

МОСКВА, 2024



# НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

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

№ 12 (80)  
Декабрь 2024 г.

Издается с декабря 2016 года

Москва  
2024

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 LXXX междунар. науч.-практ. конф. – № 12 (80). – М.: Изд. «МЦНО», 2024. – 66 с.

ISSN 2541-8394

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

ISSN 2541-8394

ББК 22+3

© «МЦНО», 2024

## **Оглавление**

<b>Технические науки</b>	<b>5</b>
<b>Раздел 1. Технические науки</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Информатика, вычислительная техника и управление</b>	<b>5</b>
АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕКСТОВ Акимжан Нагима Шопанкызы	5
<b>1.2. Кораблестроение</b>	<b>11</b>
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНО-АВТОМОБИЛЬНО- ПАССАЖИРСКОГО ПАРОМА Кочкин Максим Дмитриевич	11
РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ЦИКЛОВ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНЫХ РАБОТ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОМЫВКИ СУДОВЫХ СИСТЕМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ Лебедева Елена Геннадьевна	17
<b>1.3. Машиностроение и машиноведение</b>	<b>26</b>
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА ДЛЯ ЗАДАННОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА В МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДИЗЕЛЯ Стефановский Алексей Борисович	26
<b>1.4. Радиотехника и связь</b>	<b>33</b>
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ Надточий Виктор Николаевич Латко Владислав Владимирович Левышкин Данила Сергеевич	33

<b>1.5. Химическая технология</b>	<b>39</b>
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ В РАСПЛАВАХ LiCl-KCl-CSCL-K <sub>2</sub> SIF <sub>6</sub> Парасотченко Юлия Александровна Гевел Тимофей Анатольевич Суздальцев Андрей Викторович	39
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННОГО КРЕМНИЯ Трофимов Алексей Алексеевич Старкова Екатерина Юрьевна Зырянова Екатерина Геннадьевна	45
<b>Физико-математические науки</b>	<b>52</b>
<b>Раздел 2. Физика</b>	<b>52</b>
<b>2.1. Физика атомного ядра и элементарных частиц</b>	<b>52</b>
КАЛИБРОВКА АКТИВНОСТИ В 2П ЭТАЛОННОГО БЕТА ИСТОЧНИКА <sup>60</sup> Co С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ GEANT4 Лавский Василий Юрьевич Самойлова Елена Михайловна	52
МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА СЧЕТЧИКА СИ502БГ В СРЕДЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ GEANT4 Лавский Василий Юрьевич Самойлова Елена Михайловна	58

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### РАЗДЕЛ 1.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### 1.1. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

#### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ТЕКСТОВ

*Акимжан Нагима Шопанкызы*

*PhD, старший преподаватель,  
Казахский национальный педагогический  
университет имени Абая,  
Казахстан, г. Алматы*

#### ANALYSIS OF EXISTING METHODS OF AUTOMATIC TEXT EVALUATION

*Nagima Akimzhan*

*PhD, senior lecturer,  
Abai Kazakh National Pedagogical University,  
Kazakhstan, Almaty*

**Аннотация.** Современное образование и профессиональная среда всё чаще нуждаются в автоматической оценке текстов, таких как студенческие эссе, тестовые ответы или отчёты сотрудников, поскольку ручная проверка требует много времени и может быть субъективной. Автоматическая оценка текстов (АОТ) представляет собой перспективное направление, которое позволяет упростить этот процесс, повысить объективность и ускорить обратную связь. В данной статье про-

водится обзор существующих методов автоматической оценки текстов, рассматриваются их особенности, преимущества и недостатки.

**Abstract.** Modern education and professional environments increasingly require automatic evaluation of texts, such as student essays, test answers or employee reports, since manual checking is time-consuming and can be subjective. Automatic text evaluation (ATE) is a promising direction that allows simplifying this process, increasing objectivity, and speeding up feedback. This article provides an overview of existing methods of automatic text evaluation, discusses their features, advantages, and disadvantages.

**Ключевые слова:** автоматическая оценка текстов, проверка эссе, машинное обучение.

**Keywords:** automatic text evaluation, essay checking, machine learning.

Автоматическая оценка текстов (АОТ) – это процесс, при котором компьютерные системы оценивают качество текста на основе заданных критериев, таких как грамматическая корректность, семантическое соответствие, структура и аргументация. В современных системах используются разнообразные методы, которые можно классифицировать на несколько групп: основанные на правилах, статистические, методы машинного обучения (МО) и глубинного обучения (нейросети).

### Методы на основе правил и шаблонов

Методы на основе правил и шаблонов предполагают применение заранее заданных алгоритмов для анализа текстов. Эти правила обычно включают грамматические, синтаксические и стилистические нормы, а также шаблоны для проверки структуры текста. Рассмотрим несколько конкретных примеров таких методов:

1. Орфографическая и грамматическая проверка. Программы используют словари и наборы грамматических правил для поиска ошибок в тексте. Каждое слово и предложение анализируется на соответствие нормам языка. Если слово отсутствует в словаре или нарушены правила синтаксиса, система подсвечивает ошибку. Например, в предложении "Она пошел в магазин" система найдет ошибки и предложит корректные варианты. Примерами являются: Microsoft Word – встроенный алгоритм для проверки орфографии и грамматики, LanguageTool – онлайн-инструмент, который находит ошибки в правописании и стилистике текста.

2. Проверка на соответствие шаблону. Метод на основе анализа шаблонов предполагает, что текст должен соответствовать определен-

ной структуре. Используется для оценки текстов с фиксированными требованиями, например, формат эссе или ответы на тестовые вопросы. Пример:

- Оценка структуры эссе: Шаблон проверки может включать требования к наличию введения, основной части и заключения. Программа проверяет, присутствуют ли в тексте ключевые элементы.

- Оценка формата научной статьи: Проверка наличия разделов, таких как "Введение", "Методология", "Результаты" и "Заключение".

Принцип работы. Система анализирует текст на наличие ключевых слов или выражений, соответствующих каждому разделу. Например, если в эссе отсутствует заключение, программа выдает предупреждение.

3. Проверка на плагиат. Методы, основанные на сравнении текста с базой данных других текстов, позволяют выявить заимствования. Используются алгоритмы для поиска совпадений по шаблонам фраз. Текст разбивается на фрагменты, которые затем сравниваются с текстами из базы данных. Если найдены совпадения, система указывает на них. Пример:

- Turnitin: система для выявления плагиата, сравнивающая студенческие работы с обширной базой текстов.

- Copyscape: инструмент для проверки веб-контента на уникальность.

4. Анализ на соответствие ключевым словам и фразам. Проверка наличия определенных слов или выражений, которые должны присутствовать в тексте для удовлетворения требований задания. Примером может служить автоматическая проверка тестов: если ответ на вопрос должен содержать конкретные термины или ключевые фразы, программа проверяет их наличие.

Принцип работы: система анализирует текст на предмет наличия обязательных слов. Например, в ответе на вопрос по биологии про фотосинтез должны быть слова "свет", "хлорофилл" и "глюкоза".

5. Проверка длины и структуры предложений. Оценка текста на соответствие заданным требованиям по длине (количество слов или символов) и структуре (количество предложений в абзаце). Система подсчитывает количество слов, предложений или символов и сравнивает их с заданными параметрами. Если текст не соответствует требованиям, выводится предупреждение. Пример:

- Проверка эссе на соответствие минимальному количеству слов (например, не менее 250 слов для экзамена IELTS).

- Оценка развернутых ответов на тесты с требованием к объему.



Методы на основе правил и шаблонов эффективны для базового анализа текстов и широко используются в образовательных и профессиональных средах. Их основное преимущество – простота и прозрачность, но они ограничены в возможности анализа глубинного смысла и семантики текста. Для более сложных задач, таких как оценка аргументации или логической структуры, необходимы методы машинного и глубинного обучения.

### **Статистические методы**

Статистические методы используют количественные характеристики текста, такие как частота слов, длина предложений и распространенность определенных конструкций. Один из ключевых методов – TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency). Примеры:

- TF-IDF: Оценка значимости слов в тексте на основе их частоты.
- N-граммный анализ: Оценка вероятности появления последовательностей слов.

Преимуществами этих методов являются эффективность для оценки базовых параметров текста (сложность, насыщенность терминологией) и простота реализации и интерпретации результатов. К недостаткам можно отнести игнорирование семантических связей между словами и ограничения в оценке глубинного смысла и логической структуры текста.

### **Методы машинного обучения (МО)**

МО использует алгоритмы, которые обучаются на размеченных данных. Для текстов часто применяются классификаторы (логистическая регрессия, случайные леса, метод опорных векторов – SVM). Модели обучаются на корпусе текстов с экспертными оценками и предсказывают итоговый балл на основе анализа характеристик текста. Примеры:

- SVM (Support Vector Machines): Классификация текстов по критериям, таким как качество аргументации.
- Logistic Regression: Оценка вероятности принадлежности текста к определенному классу (например, "высокое качество" или "низкое качество").

Преимуществами являются способность учитывать множество факторов одновременно, а также возможность адаптации под разные задачи и критерии оценки. Из недостатков можно перечислить требование больших объемов размеченных данных и сложность результатов для интерпретации без дополнительных методов анализа.

## Методы глубинного обучения (нейросети)

Глубинное обучение использует многослойные нейронные сети для анализа текстов. Особое место занимают рекуррентные нейронные сети (RNN) и трансформеры (например, BERT), которые эффективно работают с последовательными данными и учитывают контекст текста. Примеры:

- LSTM (Long Short-Term Memory): Способны анализировать длинные тексты, сохраняя информацию о последовательности слов.
- BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers): Модель трансформера, которая понимает контекст слов на основе окружающих слов в предложении.

Высокая точность благодаря учету семантических и синтаксических связей и способность обрабатывать большие объемы текстовых данных и учитывать контекст являются главными преимуществами данного метода. Недостатки – высокая вычислительная сложность и потребность в ресурсах и требование большого количества обучающих данных для достижения высокой точности.

## Гибридные подходы

Комбинация нескольких методов для достижения более точной оценки. Например, использование статистических методов для предобработки данных и глубинного обучения для окончательной оценки. Примеры:

- Предобработка текста с помощью TF-IDF и последующее применение нейросетей для семантического анализа.
- Использование правил для проверки грамматики и нейронных сетей для оценки содержания.

Можно отметить такие преимущества, как объединение сильных сторон разных методов и повышенная точность и гибкость моделей. К недостаткам относится сложность реализации и интеграции разных подходов и более высокие требования к ресурсам и данным.

Современные методы автоматической оценки текстов варьируются от простых правил до сложных нейросетевых моделей. Выбор метода зависит от задачи: для оценки грамматической правильности достаточно использовать правила и статистику, тогда как для глубокого анализа аргументации и стиля необходимы модели машинного обучения или нейросети. Гибридные подходы представляют собой наиболее перспективное направление, сочетая эффективность разных методов для достижения высокой точности и надежности оценки.

### Список литературы:

1. Беляев И.Н. Технологии обработки текстов: учебное пособие / И.Н. Беляев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 280 с.
2. Dong, F., Zhang, Y., Yang, J. Attention-Based Recurrent Convolutional Neural Network for Automatic Essay Scoring // Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2017). – 2017. – С. 300–310.
3. Heilman, M., Madnani, N. ETS Research: Automated Scoring and Natural Language Processing. – Princeton, NJ: Educational Testing Service, 2013. – 29 с.
4. Jurafsky, D., Martin, J.H. Speech and Language Processing. 3rd ed. Draft. – [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://web.stanford.edu/~jurafsky/slp3/>.
5. Kumar, M., Boulanger, D. Hybrid Approaches for Text Classification: A Comparative Study // International Journal of Machine Learning and Computing. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 282–288.
6. Manning, C.D., Raghavan, P., Schütze, H. Introduction to Information Retrieval. – Cambridge: Cambridge University Press, 2008. – 482 с.

## 1.2. КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ

### РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНО-АВТОМОБИЛЬНО- ПАССАЖИРСКОГО ПАРОМА

*Кочкин Максим Дмитриевич*

*магистрант,*

*Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева – НГТУ,  
РФ, г. Нижний Новгород*

### DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF A RAILWAY-CAR AND PASSENGER FERRY

*Kochkin Maxim*

*Master's student in*

*Nizhny Novgorod State Technical University  
n.a.R.E. Alekseev – NNSTU,  
Russia, Nizhny Novgorod*

**Аннотация.** Для круглогодичного обеспечения грузопассажирского сообщения между материковой частью России и островом Сахалин проектируется железнодорожно-автомобильно-пассажирский паром. Проектирование производится путем создания цифрового двойника судна с использованием программного комплекса САПР SolidWorks.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, САПР SolidWorks, 3D-модель парома, имитационное моделирование ходкости судна.

Транспортная инфраструктура Арктики и северных регионов Дальнего Востока нуждается в круглогодичных и стабильных морских перевозках. Одной из таких задач, в частности, является обеспечение регулярного грузопассажирского сообщения между материковой частью России и островом Сахалин. Сложная ледовая обстановка и слабая портовая инфраструктура требуют разработки судна с особыми характеристиками для безопасной эксплуатации.

Для круглогодичного обеспечения грузооборота и пассажиропотока между портами Ванино – Холмск проектируется железнодорожно-автомобильно-пассажирский паром. Судно проектируется на класс Российского морского регистра судоходства [1]: КМ (самоходный), Arc5 (ледовый класс), AUT1-ICS (степень автоматизации судна), ANTI-ICE (защита от обледенения), ECO (повышенная экологическая безопасность), Ro-ro (накатное судно).

Корпус судна и его надстройка должны быть спроектированы для работы в ледовых условиях и обеспечивать надёжную эксплуатацию как в летний, так и в зимний периоды, а также иметь привлекательный и эстетичный вид. Кроме того, надстройка должна эффективно использовать пространство для размещения пассажиров и различных категорий грузов: железнодорожных вагонов, автопоездов, контейнеров.

Требуемые технические характеристики проектируемого железнодорожно-автомобильно-пассажирский паром:

- $L = 120,9$  м – длина судна;
- $T = 6,5$  м – осадка судна;
- $v = 18/12$  узлов – скорость полного/экономного хода.
- $B = 24$  м – ширина судна;
- $H = 16,6$  м – высота до верхней палубы;
- $D = 14171$  т – водоизмещение судна в полном грузу;

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) выбрать технологию проектирования;
- 2) проанализировать технические требования к парому и выбрать архитектурно-конструктивный тип паромы;
- 3) разработать компоновку судна;
- 4) рассчитать полное сопротивление при движении судна;
- 5) провести расчеты ледовой ходкости для подтверждения соответствия требованиям ледового класса Arc5.

Было принято решение проводить проектирование путем создания цифрового двойника [2,3].

Цифровой двойник – это цифровая виртуальная модель любого физического объекта, которая копирует его форму, характеристики, действия [4].

Цифровая модель (цифровой двойник) уже на стадии проектирования применяются для проверки и подтверждения принимаемых технических решений и моделирования различных условий эксплуатации объекта. На основе цифровой модели можно проводить модельные испытания вместо натуральных, разрабатывать технологию изготовления и создавать управляющие программы для станков с ЧПУ. Все это позволяет получить представление о конечном результате уже на началь-

ном этапе и построить судно, максимально приближённое к требованиям заказчика, а также минимизировать ошибки при проектировании, сэкономить время и средства.

Создание цифрового двойника проектируемого железнодорожно-автомобильно-пассажирского паромов позволяет иметь 3D-модель судна на компьютере, которая в точности повторяет всю конструкцию, расположение помещений, оборудования и даже расположение груза. По сути, цифровой двойник дублирует реальность в виртуальной среде.

Для реализации технологии цифрового двойника необходима САПР.

Нами был выбран программный комплекс САПР SolidWorks (далее – SW) [5,6,7]. Он идеально подходит для решения задач современного проектирования, в том числе такого сложного инженерного сооружения, каким является судно. Благодаря множеству приложений SolidWorks охватывает весь процесс проектирования – от создания модели конструкции до разработки управляющей программы для станков с ЧПУ. При этом передача данных между CAD, CAE и CAM происходит напрямую без применения сторонних форматов, что значительно упрощает и ускоряет процесс проектирования.

Вот только некоторые основные модули SolidWorks [5].

1. Модуль SW 3D CAD. Он является основой всего комплекса продуктов SolidWorks и обеспечивает все аспекты жизненного цикла изделия: проектирование, проверку технологичности, моделирование, производство, экологическую экспертизу, оценку себестоимости и управление данными.

2. Модули SW Simulation и Flow Simulation. Эти модули применяются для различных инженерных расчетов и анализа. SW Simulation используется для моделирования прочностных характеристик, анализа напряжений, деформаций и топологической оптимизации конструкций. Это позволяет оптимизировать элементы судна, такие как корпуса, балки или крепежные конструкции, снижая их вес без потери прочности. SW Flow Simulation предназначен для анализа потоков воды и воздуха, что помогает оценить поведение судна в различных эксплуатационных условиях. Рассмотрим примеры использования этих модулей в практике судостроения:

а) SW Simulation: оптимизация якорных устройств или рамных конструкций для уменьшения их массы при сохранении прочностных характеристик.

б) SW Flow Simulation: позволяет моделировать движение судна с учетом различных факторов (ветер, течение, волнение и другие нагруз-

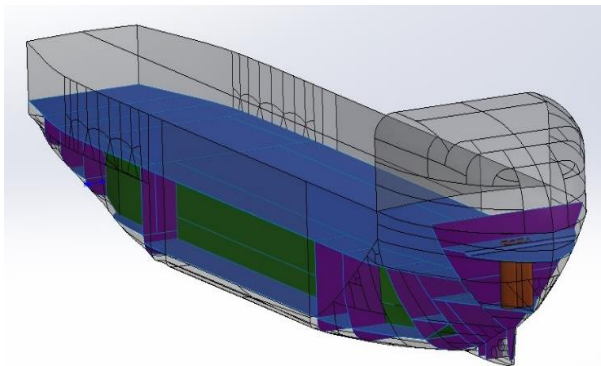
ки на корпус). Понимание его маневренных возможностей в условиях различных нагрузок и внешних факторов.

3. Модуль SW Manage обеспечивает управление проектами. Он позволяет гибко и эффективно отслеживать взаимосвязи между проектами, сохраняя всю документацию в одном месте. Также имеется возможность планировать и администрировать ресурсы, контролировать выполнение каждой задачи. Модуль предусматривает создание отчетов по запросу или на основе расписания.

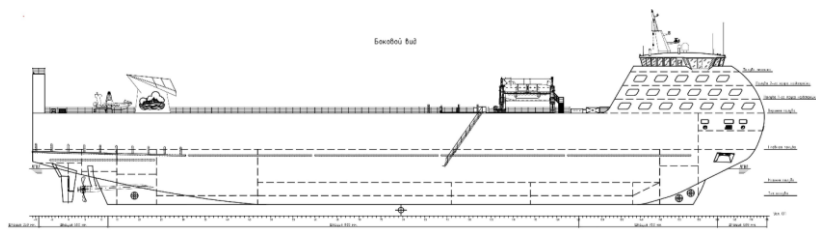
Проанализировав технические требования к парому, была выбрана конструкция железнодорожно-автомобильно-пассажирского парома с носовой надстройкой обтекаемой формы. Это позволяет снизить лобовое сопротивление от ветра до 30%. Кроме того, такое размещение надстройки улучшает обзорность судна и освобождает верхнюю палубу для размещения дополнительного груза.

Используя программный комплекс САПР SolidWorks в работе, была разработана цифровая модель (3-х мерная модель корпуса) судна и его компоновка (рисунок 1, 2).

Созданный цифровой двойник парома был использован при имитационном моделировании обтекания неподвижного корпуса парома движущимся потоком воды и воздуха [8]. Сравнение полученных результатов численных расчетов с расчетами по приближенным методикам показывает их удовлетворительную точность при сравнительно низких затратах ресурсов, были получены следующие результаты относительно дорогостоящих экспериментальных исследований в гидродинамических лабораториях.



*Рисунок 1. Модель поверхности проектируемого судна*



**Рисунок 2. Общее расположение проектируемого судна**

В дальнейшем предполагается использовать созданный цифровой двойник парома для решения основных проектных задач: конструирование мидель-шпангоута, определение объемов всех помещений, разработка общего расположения, определение ходкости судна на чистой воде, а также в ледовых условиях. Все эти исследования позволят оптимизировать конструкцию проектируемого судна.

В ходе исследований получены следующие результаты:

1. Выбрана технологическая платформа для проектирования парома: Цифровой двойник и программный комплекс САПР SolidWorks.
2. Выбрана конструкция корпуса с подкрепляющим его набором и разработана его компоновка.
3. Создан цифровой двойник парома (цифровая копия).
4. Проведена апробация цифрового двойника парома на имитационном моделировании обтекания неподвижного корпуса движущимся потоком воды и воздуха. Отдельно были проведены расчёты ледовой ходкости, которые показали, что судно сохраняет операционную скорость при переходе через битый лёд и может самостоятельно заходить в порты в условиях тяжёлой ледовой обстановки.
5. Намечен план дальнейших исследований.

### **Список литературы:**

1. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. ФАУ «Российский морской регистр судоходства» [Электронный ресурс]. URL: [https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rc\\_rus&d=24-80457/](https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rc_rus&d=24-80457/) (дата обращения: 05.12.2024).
2. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.
3. Цифровые двойники в судостроении // Портал «Российское судоходство» [Электронный ресурс]. URL: <https://russhipping.ru/ru/stats/?id=1084&print=1/> (дата обращения: 05.12.2024).



4. Что такое цифровые двойники и где их используют [Электронный ресурс]. URL: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb/> (дата обращения: 05.12.2024).
5. Решения SOLIDWORKS [Электронный ресурс]. URL: <https://sw.csoft.ru/solutions.html/> (дата обращения: 05.12.2024).
6. Подробный обзор программы SolidWorks [Электронный ресурс]. URL: <https://junior3d.ru/article/solidworks.html?ysclid=m4a9nz192822933167/> (дата обращения: 05.12.2024).
7. Князьков В.В. SolidWorks. Проектирование судов: учеб. пособие / В.В. Князьков; НГТУ им. П.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2018. – 228 с.
8. Кочкин М.Д. Определение сопротивления движения судна в САПР SOLIDWORKS // Сборник материалов XXIII Всероссийской молодежной научно-технической конференции. – Нижний Новгород, 2024.

## РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ЦИКЛОВ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНЫХ РАБОТ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОМЫВКИ СУДОВЫХ СИСТЕМ ПУЛЬСИРУЮЩИМ ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ

*Лебедева Елена Геннадьевна*

*канд. техн. наук,  
Северный арктический Федеральный  
университет им. М.В. Ломоносова,  
институт судостроения  
и морской арктической техники,  
РФ, г. Северодвинск*

## DEVELOPMENT OF THE MAIN CYCLES OF EXPERIMENTAL WORK ON INTENSIFICATION OF FLUSHING OF MARINE SYSTEMS WITH A PULSATING TWO-PHASE FLOW

*Elena Lebedeva*

*Candidate of Technical Sciences,  
Lomonosov Northern Arctic Federal  
University, Institute of Shipbuilding  
and Marine Arctic Engineering,  
Russia, Severodvinsk*

**Аннотация.** При промывке протяженных судовых систем может быть использован смешанный двухфазный поток воды и воздуха. Данный способ промывки судовых систем имеет хорошую перспективу для внедрения на производстве. Для разработки технологии промывки систем пульсирующим двухфазным потоком необходимо разработать блок интенсификации, содержащий устройства подачи воздуха и смешивания двухфазного потока, а также разработать технологию промывки систем двухфазным потоком. Подготовка к опытным работам.

**Abstract.** When flushing extended ship systems, a mixed two-phase flow of water and air can be used. This method of washing marine systems has a good prospect for implementation in production. To develop a technology for flushing systems with a pulsating two-phase flow, it is necessary to develop an intensification unit containing two-phase air supply and mixing devices, as well as to develop a technology for flushing systems with a two-phase flow. Prepare the experimental work.

**Ключевые слова:** опытные работы, промывочный стенд, двухфазный поток, промывка судовых систем.

**Keywords:** experimental work, flushing stand, two-phase flow, flushing of ship systems.

Способами, интенсифицирующими процесс промывки систем на судне, являются применение пульсаторов в потоке, закручивание потока в каналах, аэрация (барботирование) промывочного потока. Данные способы являются эффективными, так как приводят к разрушению пограничного слоя на стенках трубопроводах, устранению застойных зон. Двухфазный поток обладает также повышенными флотационными свойствами по отношению к частицам загрязнений. Создание промывочного стенда, предназначенного для проведения гидродинамической промывки, но и имеющего устройства интенсификации является актуальной задачей. Средствами интенсификации могут быть различные пульсаторы, устройства изменения направления потока, устройства закрутки потока, устройство барботажа. На базе такого стенда можно также комбинировать методы интенсификации, например, применять одновременную закрутку и подавать воздух для создания двухфазного потока [4]. Особенно перспективным является пульсирующий двухфазный поток в качестве промывочной среды [2].

Пробные работы на менее протяженных трубах, чем судовые системы, проводились на базе ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова». Промывка участка системы, показала, что оптимальный режим промывки осуществляется при объемном содержании воздуха  $\varphi=0,33-0,5$  с использованием чередования промывки однофазным и двухфазным потоком. В первые 5 дней (в две смены) работы промывочного устройства вымывается основное количество загрязнителя. Общая продолжительность промывочных работ принимается 21 суток (в две смены) [1].

По результатам испытания пробной опытной установки пульсации и барботажа промывочной воды (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова») на участке трубопровода [1] показало общее ускорение удаления загрязнений по усредненным показателям и составило:

- на начальной стадии промывки – в 2 раза;
- на конечной стадии промывки – в 3,5 раза.

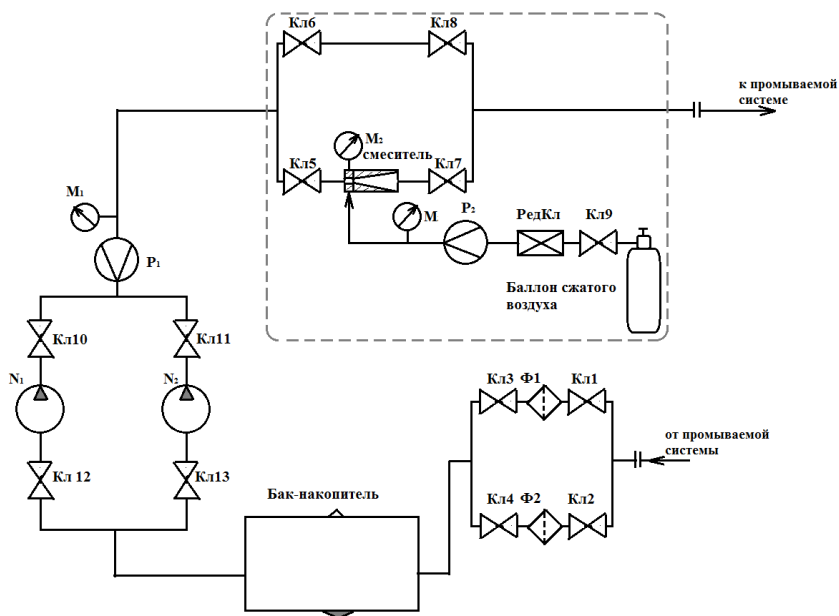
По результатам испытания установки барботажа ускорение удаления загрязнений составило:

- на начальной стадии промывки – на 17...37%;
- на конечной стадии промывки – до 3...5 раз.

Для установки барботажа были определены возможность снижения расхода промывочной воды и электропотребления до 50% [1].

Для разработки промывочного стенда для реальных производственных условий, который бы сочетал в себе способы интенсификации промывки на ряду с традиционным способом промывки, воспользуемся стандартным стендом гидродинамической промывки.

Поэтому стенд для осуществления промывки двухфазным пульсирующим потоком имеет те же элементы, что и стенд гидродинамической промывки. В качестве дополнительного устройства предусматривается блок, отвечающий за подачу в систему воздуха в количестве, определенном расчетным путем. Блок подачи воздуха имеет смеситель, установленный непосредственно в нагнетательной части стенда и осуществляющий не только смешивание двухфазного потока, но и одновременно являющийся источником пульсаций. Принципиальная схема стенда представлена на рисунке 1. Блок подачи воздуха к смесителю на рисунке 1 обозначен пунктирной линией.

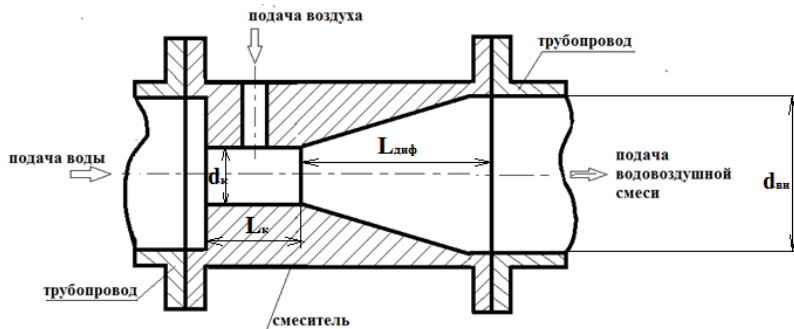


**Рисунок 1. Принципиальная схема промывочного стенда с использованием пульсирующего двухфазного потока**

Промывочный стенд содержит емкость с промывочной жидкостью (водой), при необходимости из которого осуществляется слив промывочной воды и травление имеющегося воздух. Емкость лучше

располагать в верхних точках системы. В промывочном стенде используется два параллельно включенных промывочных насоса  $N_1$  и  $N_2$  для увеличения суммарной подачи промывочной воды в системе. Насосы в случае необходимости могут работать в одиночку. Отсечение насосов можно осуществить клапанами Кл10, Кл11, Кл12, Кл13. Расходомер  $P_1$  используется для измерения объемного расхода промывочной воды. Манометр  $M_1$  предназначен для регистрации давления в промываемом однофазном потоке воды. Далее поток поступает к тройнику и в зависимости от решаемой задачи направляется в виде однофазного (через открытые клапаны Кл6 и Кл8, клапаны Кл5 и Кл7 при этом закрыты) или двухфазного потока (через открытые клапаны Кл5 и Кл7, клапаны Кл6 и Кл8 при этом закрыты) к промываемой системе. Подача воздуха в смеситель осуществляется при помощи блока подачи воздуха, на рисунке выделенным пунктирной линией. Воздух поступает от баллона сжатого воздуха при открытом клапане Кл9. Количество сжатого воздуха регулируется также клапаном Кл9. Проходя через редукционный клапан дроссельного типа РедКл давление воздуха понижается до требуемого значения. Далее воздух проходит через расходомер  $P_2$ . Измеряется давление воздуха по манометру  $M_3$ . И потом, через узкую трубу подается к узкой части смесителя. Давление в узкой части смесителя определяется по манометру  $M_2$ . В смесителе поток воды и воздуха приобретает пузырьковый режим благодаря резонансным явлениям при совпадении частот собственных колебаний пузырьков воздуха и диффузорной части смесителя.

Для проведения интенсификации промывочных работ судовых систем потоком воды используется смеситель (рисунок 2), организующий подачу к промываемому трубопроводу смеси воды и воздуха. Для обеспечения работы смесителя требуется подвод воздуха. Сжатый воздух подается от баллона через блок подготовки воздуха при помощи воздушного технологического трубопровода к смесителю. Смеситель устанавливается на напорной магистрали подачи промывающей воды от промывочного насоса и обеспечивает смешение и одновременную пульсацию двухфазного потока с определенной частотой. Блок подготовки сжатого воздуха обеспечивает регулирование давления и расхода.



**Рисунок 2 Смеситель-пульсатор двухфазного потока**

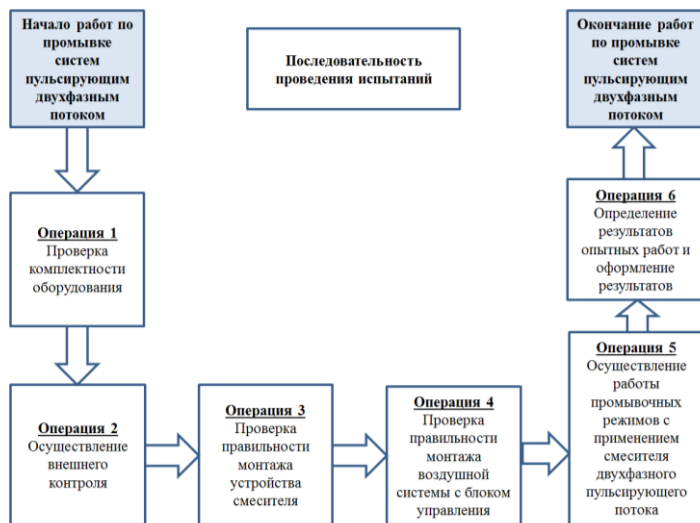
Смеситель обеспечивает подачу подготовленного сжатого воздуха в промываемый поток и создает двухфазную промывающую пульсирующую среду.

Смеситель должен быть установлен на нагнетательной части трубопровода максимально близко к промываемой системе. Место установки должно быть в пределах доступа для подвода воздуха от баллона сжатого воздуха с целью подачи в смеситель сжатого воздуха. Воздух к смесителю должен проходить через блок подготовки воздуха и редукционный клапан. Блок подготовки воздуха размещается в безопасном и удобном для обслуживания месте. Для осуществления контроля за параметрами воздушной среды, проходящего через блок подготовки воздуха, необходимо предусмотреть установку манометров и расходомер в соответствующих местах, рисунок 1.

**Объектом проведения испытаний** по применению интенсифицирующей технологической операции является разветвленная судовая система судна на этапе ее промывки с использованием устройства смешения и одновременной пульсации двухфазного потока.

**Целью испытаний** данного стенда с устройством смешивания и пульсации двухфазного потока являются: проверка устройства смешивания теоретическим положениям, представленным в [3]; проверка работоспособности устройства смесителя; проверка соответствия оптимальных режимов работы; проверка безопасности проведения работ по промывке двухфазным пульсирующим потоком; определение эффективности применения данного способа промывки при заданных документацией критериях чистоты в реальных условиях.

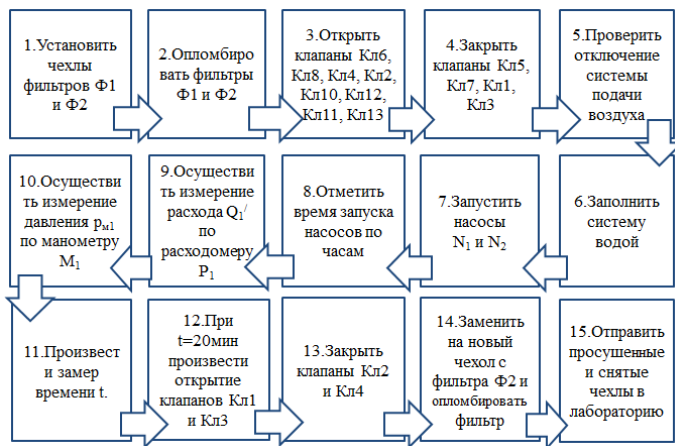
Последовательность работ представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3. Последовательность проведения испытаний по промывке систем пульсирующим двухфазным потоком**

Процесс промывки проводится с хронометражем затраченного времени в два цикла, соответствующий однофазной и двухфазной промывки для сравнения. Время проведения опытных промывок за цикл составляет 20 минут. Итого 40 минут.

1-ый цикл промывки (третий, пятый аналогично) – в течении заданного времени с контролем по часам в режиме промывка системы через контрольную сливную группу фильтров Ф2 промывочного стенда с контролем расхода по расходомеру  $P_1$  (расход промывочной воды  $Q'$ ) и давления  $p_{M1}$  по манометру  $M_1$ . Оставшаяся группа фильтров Ф1, а также подача воздуха отключены задвижками. Далее происходит отсечение группы фильтров Ф2 с дальнейшей их выемкой и просушкой (для осуществления контроля путем взвешивания сухого остатка). При этом промывочные насосы  $N_1$  и  $N_2$  не перестают осуществлять подачу воды. При отключенной группе фильтров Ф2 происходит замена на новые чехлы фильтров с опломбированием. Алгоритм промывки систем однофазным потоком представлен на рисунке 4.



**Рисунок 4. Первый цикл промывки однофазным потоком**

2-ой цикл промывки (четвертый, шестой циклы аналогично) – в течении заданного времени с контролем по часам в режиме промывочной системы через контрольную сливную группу фильтров Ф1 промывочного стенда с контролем расхода по расходомерам  $P_1$  и  $P_2$  (расход промывочной воды  $Q'$  и расход воздуха  $Q''$ ) и давления  $p_{m1}$  воды по манометрам  $M_1$  и давления смеси  $p_{m2}$  по манометру в смесителе  $M_2$  с использованием смесителя для получения пульсирующего двухфазного потока. Задвижки, осуществляющие направление потока к группе сливных фильтров Ф1 открыты. Группа фильтров Ф2 отключена.

Для подачи воздуха в систему через смеситель необходимо осуществить открытие запорной арматуры на трубопроводе подачи воздуха Кл9 с предварительным выставлением редуцирующей арматуры РедКл в нужное положение. Давление воздуха  $p_{m3}$  по показаниям манометра  $M_3$  должно быть больше давления промывочной воды в напорной магистрали, регистрируемого по показаниям манометра смесителя, то есть  $p_{m3} > p_{m2}$ . При этом, определяется расход воздуха по расходомеру  $P_2$  (расход воздуха  $Q''$ ) в воздушной подводящей трубе. Открытие арматуры Кл9 на воздушном трубопроводе проводится постепенно с одновременной корректировкой давления воздуха. Далее осуществляется увеличение расхода воздуха до оптимального значения.

В процессе промывки необходимо осуществлять контроль за давлением воздуха, давления воды перед смесителем по манометрам, расхода воды и воздуха по соответствующим приборам.

После окончания данного 20-минутного цикла прекращается подача воздуха, открываются задвижки Кл2 и Кл4, направляющие поток



к группе фильтров Ф2, закрываются задвижки Кл1 и Кл3, направляющие поток на группу фильтров Ф1. Проводятся работы по извлечению и просушке чехлов группы фильтров Ф1 с одновременной их заменой на новые и последующим опломбированием. Алгоритм второго цикла промывки (с использованием двухфазного потока) представлен на рисунке 5.

Результаты испытаний первого и второго циклов (однофазной и двухфазной промывки соответственно) заносятся в таблицу 1.

Таблица 1.

**Перечень параметров, подлежащих измерению  
в период проведения циклов промывки**

Цикл	Вид примененного потока	Расход воды, $Q'$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	Расход воздуха, $Q''$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	Объемное	Давление воздуха по манометру $M_1$ , $P_{\text{м1}}$ , МПа	Давление воздуха в смесителе $M_2$ , $P_{\text{м2}}$ , МПа	Масса загрязнителя, мг
1	однофазный	$Q'_1$	-	-			$m_{\text{загр 1}}$
2	двухфазный	$Q'_2$	$Q''_2$	$\varphi_2$			$m_{\text{загр 2}}$



Рисунок 5. Второй цикл промывки двухфазным потоком

Переход между промывочными циклами осуществляется без остановки насосов с заменой фильтрующих элементов фильтров в зависимости от положения открыто/закрыто клапанов.

При заводдушивании системы в верхних точках на технологических участках системы необходимо предусмотреть устройство стравливания воздуха. Для этого производится остановка подачи воздуха через Кл9.

Методика оценки результатов опытной промывки судовых систем сводится к определению и сравнению скорости выведения загрязнителя  $U$  (мг/час) за определенные периоды. Оцениваются периоды работы промывочного контура однофазным и двухфазным потоком относительно первого и второго цикла, с занесением полученных данных в таблицу 1.

Скорость выведения загрязнителя определяется по формуле:

$$U_{\text{цикл}} = \frac{m_{\text{загр цикл}}}{t_{\text{цикл}}} 60, \text{ мг/час.}$$

Таким образом, проведена подготовка к выполнению и обработке результатов опытных работ по промывке с использованием устройства смешивания и пульсации двухфазного потока с целью получения ускорения промывочных работ.

### Список литературы:

1. Александров Н.И., Канаев Д.Н., Лямин П.Л., Лебедева Е.Г. Новые средства технологического оснащения для промывки судовых водяных систем и оборудования // Международный научно-исследовательский журнал. – Екатеринбург. – 2014. – № 2-1 (21). – С. 93–95.
2. Лебедева Е.Г. Интенсификация технологии промывки судовых систем пульсирующим двухфазным потоком: дисс. ... канд. тех. наук. – Санкт-Петербург, 2012.
3. Лебедева Е.Г. Определение основных элементов пульсатора двухфазного потока для осуществления промывки судовых систем // Морские интеллектуальные технологии. – 2024. – № 2-1 (64). – С. 74–81.
4. Соловьев Б.В. Очистка судовых систем от технологических загрязнений. – Л.: Судостроение, 1977. – 75 с.

### 1.3. МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА ДЛЯ ЗАДАННОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ РАБОЧЕГО ТЕЛА В МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ДИЗЕЛЯ

*Стефановский Алексей Борисович*

*канд. техн. наук, доц.,*

*Мелитопольский государственный*

*университет,*

*РФ, г. Мелитополь*

#### DETERMINATION OF A VALUE OF THE AIR EXCESS COEFFICIENT FOR A GIVEN WORKING FLUID MAXIMUM TEMPERATURE IN THE DIESEL ENGINE OPERATING CYCLE MODEL

*Alexei Stefanovsky*

*Candidate of Science, Associate Professor,*

*Melitopol State University,*

*Russia, Melitopol*

**Аннотация.** В рамках классического теплового расчёта дизеля предложен способ определения величины коэффициента избытка воздуха, при которой достигается заданная максимальная температура рабочего тела. Использование этого способа пояснено на основе опубликованных индикаторных диаграмм рабочих циклов дизелей.

**Abstract.** Within the framework of the classical thermal calculation of a diesel engine, a method is proposed for determining the value of the air excess coefficient at which a given maximum temperature of the working fluid is reached. Using this method is explained on the basis of published indicator diagrams of diesel engine operating cycles.

**Ключевые слова:** коэффициент избытка воздуха, максимальная температура рабочего тела, рабочий цикл, дизель.

**Keywords:** air excess coefficient, maximum temperature of the working fluid, operating cycle, diesel engine.

Наряду с максимальным давлением рабочего тела  $p_{\max}$  в цикле дизеля, важным показателем служит и максимальная температура рабочего тела  $T_{\max}$ , усреднённая по объёму последнего. Согласно Лазареву [6, с. 83], от уровня  $p_{\max}$  зависит механическая напряжённость (в том числе «жёсткость» сгорания), а от уровня  $T_{\max}$  – тепловая напряжённость работы дизеля. Можно представить, что исходя из допустимой тепловой напряжённости ответственных деталей последнего, будет задана величина  $T_{\max}$ .

В классическом тепловом расчёте (ТР) дизеля максимальная температура рабочего тела  $T_z$  – термодинамический аналог температуры  $T_{\max}$  – находится как один из двух корней квадратного уравнения [5, с. 78; 9, с. 35]

$$a_z T_z^2 + b_z T_z - c_z = 0, \quad (1)$$

где  $a_z$  и  $b_z$  – коэффициенты, зависящие от коэффициента избытка воздуха (КИВ)  $\alpha_{\text{ив}}$  и имеющие единицы измерения Дж/(моль\*К<sup>2</sup>) и Дж/(моль\*К);  $c_z$  – свободный коэффициент (Дж/моль), зависящий также от ряда других факторов:

$$c_z = \left( \frac{\xi_z Q_{\text{HT}}}{\alpha_{\text{ив}} M_0 (1 + \gamma_r)} + T_c (\mu c_v' + 8,314 \lambda_z) \right) / \beta_{\text{ми}}, \quad (2)$$

где  $\xi_z$  – коэффициент использования теплоты при сгорании (КИТС);  $\lambda_z$  – степень повышения давления при сгорании (СПДС);  $\gamma_r$  – коэффициент остаточных газов;  $Q_{\text{HT}}$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $M_0$  – стехиометрическое количество воздуха для полного сгорания топлива, кмоль/кг;  $T_c$  – температура рабочего тела в конце сжатия, К (при верхнем положении поршня и отсутствии сгорания);  $\mu c_v'$  – средняя удельная теплоёмкость свежего заряда, Дж/(моль\*К), зависящая от  $T_c$ ;  $\beta_{\text{ми}}$  – коэффициент молекулярного изменения, равный

$$\beta_{\text{ми}} = 1 + \frac{H_T}{4 \alpha_{\text{ив}} M_0 (1 + \gamma_r)}, \quad (3)$$

где  $H_T$  – массовое содержание водорода в топливе. Параметры  $Q_{\text{HT}}$  и  $M_0$  зависят от  $H_T$ , а также от массового содержания других химических элементов в топливе ( $C_T$ ,  $O_T$ ,  $S_T$ ), причём основное влияние оказывают  $H_T$  и  $C_T$ .

Таким образом, кроме  $\alpha_{\text{ив}}$ , на  $T_z$  влияют параметры  $\xi_z$ ,  $\gamma_r$ ,  $\lambda_z$ ,  $T_c$  и свойства дизельного топлива (параметры  $Q_{\text{HT}}$ ,  $M_0$  и  $H_T$ ). В свою очередь, температура сжатого заряда  $T_c$  зависит от температуры заряда в

конце впуска  $T_a$ , степени сжатия  $\varepsilon$  и среднего показателя политропы сжатия, а на  $T_a$  влияют коэффициент  $\gamma_T$  и температура  $T_T$  остаточных газов, температура среды во впускных каналах  $T_{0(k)}$  и увеличение температуры  $\Delta T_a$  этой среды при поступлении в цилиндр. Для данных марки дизеля и сорта топлива, параметры  $\varepsilon$ ,  $Q_{HT}$  и  $M_0$  постоянные, а другие параметры (кроме  $\xi_z$ ,  $\lambda_z$  и  $\alpha_{ив}$ ) влияют на  $T_z$  незначительно или изменяются слабо. Из трёх параметров, перечисленных в скобках, можно исключить СПДС  $\lambda_z$ , предполагая, что в различных случаях ТР и для реальных дизелей номинальные значения СПДС и КИВ изменяются взаимно-противоположно (то есть, в выборках выполненных ТР и исследованных реальных дизелей при снижении КИВ растёт СПДС и наоборот). Поэтому, в конечном счёте, основную роль играет влияние КИТС и КИВ на расчётную максимальную температуру заряда  $T_z$ . Из этих двух параметров изменяемым в большей степени и легко управляемым в дизелях (за счёт изменения цикловой подачи топлива) является КИВ.

Цель работы – предложить соответствующий классическому ТР способ определения величины КИВ, при которой достигается заданная максимальная температура заряда  $T_z$ .

Рассмотрим, как выразить КИВ  $\alpha_{ив}$  из исходного уравнения (1), учитывая выражения для коэффициентов  $a_z$  и  $b_z$  [7 и 8, с. 11; 9, с. 34]:

$$a_z = 10^{-3}(1,55 + 1,38/\alpha_{ив}); b_z = 28,414 + 0,92/\alpha_{ив}. \quad (4a, 4б)$$

Выражение для свободного коэффициента  $c_z$  (2) имеет вид отношения двух функций, линейных относительно обратной величины  $1/\alpha_{ив}$ , которую можно условно назвать «коэффициентом избытка топлива» и обозначить  $\alpha_{ит}$ :

$$c_z = \frac{\xi_z a_1 \alpha_{ит} + a_0}{1 + a_2 \alpha_{ит}}, \quad (5)$$

где  $a_0$  – это второе слагаемое в скобках выражения (2), а коэффициенты  $a_1$  и  $a_2$  взаимосвязаны:

$$a_1 = \frac{Q_{HT}}{M_0(1+\gamma_T)}; a_2 = \frac{H_T}{4M_0(1+\gamma_T)}; a_1/a_2 = 4Q_{HT}/H_T. \quad (6a, 6б, 6в)$$

Выражения (4a, 4б) принимают вид

$$a_z = 10^{-3}(1,55 + 1,38\alpha_{ит}); b_z = 28,414 + 0,92\alpha_{ит},$$

и с учётом (5) уравнение (1) примет вид

$$10^{-3}(1,55 + 1,38\alpha_{иТ})T_z^2 + (28,414 + 0,92\alpha_{иТ})T_z = \frac{\xi_z a_1 \alpha_{иТ} + a_0}{1 + a_2 \alpha_{иТ}} \quad (7)$$

Оно приводится к квадратному относительно  $\alpha_{иТ}$ :

$$a_{иТ}\alpha_{иТ}^2 + b_{иТ}\alpha_{иТ} + c_{иТ} = 0, \quad (8)$$

где коэффициенты  $a_{иТ}$ ,  $b_{иТ}$  и  $c_{иТ}$  определяются с помощью выражений

$$a_{иТ} = a_2 T_z (0,92 + 1,38 \cdot 10^{-3} T_z); \quad (9a)$$

$$b_{иТ} = (1,38 + 1,55 a_2) 10^{-3} T_z^2 + (0,92 + 28,414 a_2) T_z - \xi_z a_1; \quad (9b)$$

$$c_{иТ} = 1,55 \cdot 10^{-3} T_z^2 + 28,414 T_z - a_0. \quad (9b)$$

Корни квадратного уравнения (8) определяются выражением

$$\alpha_{иТ} = \frac{b_{иТ}}{2a_{иТ}} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{4a_{иТ}c_{иТ}}{b_{иТ}^2}} \right). \quad (10)$$

Какой из двух корней правильный (то есть даст величину  $\alpha_{иТ}$ , которая согласуется с опытом эксплуатации и моделирования работы дизелей), можно установить, рассмотрев следующий пример.

В работе [2, с. 121] для автомобильного дизеля «Татра-912» (6Ч 11/13) опубликована свёрнутая индикаторная диаграмма (ИД), где изображены линии процессов с рабочим телом в координатах давление – объём и температура – объём ( $p - V$ ,  $T - V$ ). При этом максимальные параметры заряда были следующие: давление  $p_{\max} \approx p_z = 7,23$  МПа (в оригинале выражено в кгс/см<sup>2</sup>, установлено с помощью шкалы давления); температура  $T_{\max} = 2140$  К и  $T_z = 2080$  К (соответственно, согласованная с  $p_{\max}$  и найденная с помощью ТР; значения были указаны на поле ИД). Режим работы данного дизеля можно считать номинальным (и по частоте вращения, и по уровню подачи топлива). Так как подробности ТР этого дизеля не были опубликованы, то примем следующие значения параметров:  $\xi_z = 0,75$  (типично для быстроходных автотракторных дизелей);  $\gamma_r = 0,03$ ;  $\lambda_z \approx 1,64$  (установлена с помощью линий сжатия и сгорания в координатах  $p - V$ );  $T_c \approx 950$  К (установлена с помощью линии сжатия в координатах  $T - V$ ); свойства топлива  $Q_{иТ} = 42500$  кДж/кг;  $H_T = 0,13$ ;  $M_0 = 0,495$  кмоль/кг (типичны в литературе по теории двигателей внутреннего сгорания). Тогда после

подстановки этих значений в формулы (6а), (6б), (9а – 9в) и с учётом (2) получим:

$$a_0 = 950 (20,16 + 0,00174 \cdot 950 + 8,314 \cdot 1,64) \approx 33676 \text{ Дж/моль};$$

$$a_1 = 42500 / (0,495 \cdot 1,03) \approx 83358 \text{ Дж/моль};$$

$$a_2 = 0,13 / (4 \cdot 0,495 \cdot 1,03) = 0,063744 \dots \approx 0,064 \text{ кг/кмоль};$$

$$a_{\text{ит}} = 0,06374 \cdot 2080 (0,92 + 0,00138 \cdot 2080) = 502,560 \text{ кг} \cdot \text{кДж/кмоль}^2;$$

$$b_{\text{ит}} = (1,38 + 1,55 \cdot 0,06374) 10^{-3} 2080^2 + (0,92 + 28,414 \cdot 0,06374) 2080 - \\ - 0,75 \cdot 83358 = 6397,89 + 5680,94 - 62518,5 = -50439,7 \text{ Дж/моль}; c_{\text{ит}} = \\ (0,00155 \cdot 2080 + 28,414) 2080 - 33976 = 32131 \text{ Дж/моль}.$$

Согласно (10), два значения коэффициента избытка топлива  $\alpha_{\text{ит}}$ , являющиеся корнями квадратного уравнения (8), определяются из выражения

$$\alpha_{\text{ит}} = \frac{-50439,7}{2 \cdot 502,56} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 502,56 \cdot 32131}{(-50439,7)^2}} \right) \approx 50,1828 \left( 1 \mp \sqrt{1 - 2,5388 \cdot 10^{-2}} \right)$$

и оба положительные:  $\alpha_{\text{ит}} = \{0,641115; 99,72446\}$ . Им соответствуют два значения КИВ:  $\alpha_{\text{ив}} = 1/\alpha_{\text{ит}} = \{1,55978; 0,0100276\}$ , из которых только первое можно обеспечить в дизеле (речь идёт о суммарном КИВ, а не о локальном). Значит, в (10) правильный знак – это плюс. Последнее выражение можно упростить, учитывая, что для малого числа  $x$ , вычитаемого из единицы,  $(1-x)^{0,5} \approx 1-x/2$  [1, с. 87 и 132]:

$$\alpha_{\text{ит}} \approx \frac{b_{\text{ит}}}{2a_{\text{ит}}} \left( -1 + 1 - \frac{4a_{\text{ит}}c_{\text{ит}}}{2b_{\text{ит}}^2} \right) = \frac{-c_{\text{ит}}}{b_{\text{ит}}}; \quad \alpha_{\text{ив}} \approx \frac{-b_{\text{ит}}}{c_{\text{ит}}}. \quad (11а, 11б)$$

Тогда в рассмотренном примере получится значение КИВ

$$\alpha_{\text{ив}} = 50439,7/32131 = 1,56981 \dots,$$

очень близкое к 1,55978 (относительное завышение менее точного результата 0,64%).

Выражения (11б), (9б) и (9в) позволяют кратко охарактеризовать влияние максимальной температуры  $T_z$  и КИТС на КИВ. Влияние  $T_z$  – сложное, так как в числитель и знаменатель (11б) входит эта температура в 1-й и 2-й степенях. Но влияние КИТС  $\xi_z$  на КИВ описывается линейной функцией, так как этот параметр находится только в числителе (11б), согласно (9б). Поэтому чем более высокое значение КИТС задано, тем больше будет числитель (11б) и, следовательно, КИВ для заданной температуры  $T_z$ . Так как при увеличении КИВ полнота сгорания и эффективность рабочего цикла дизелей повышаются

ся [3, с. 85; 6, с. 73], то отмеченный характер влияния КИТС на КИВ не противоречит опытным данным.

На величину расчётной максимальной температуры  $T_z$  влияет принятый способ вычисления средних теплоёмкостей сред. В приложении учебника [4, с. 369] изображена развёрнутая ИД турбопоршневого дизеля ( $\epsilon = 12$ , давление наддува около 0,35 МПа) для КИВ  $\alpha_{\text{кив}} = 1,9$ , на которой показано изменение давления и температуры рабочего тела при моделировании цикла упрощённым (классический ТР) и более сложным способами. При этом в первом случае  $T_z \approx 1880$  К для значений параметров ТР  $\xi_z = 0,85$ ;  $\gamma_f = 0,03$ ;  $\lambda_z \approx 1,78$ ;  $T_c \approx 798$  К, а во втором случае максимальная температура  $T_{\text{max}} \approx 1785$  К. Применение вышеописанного способа вычисления КИВ к этим сведениям дало величину  $\alpha_{\text{кив}} \approx 2,02$  (примерно на 6% больше 1,9), а расчёт температуры  $T_z$  с использованием выражений (4а), (4б), (3) и (2) дал её величину около 1930 К (на 2,6% выше). Но так как, независимо от принятого в ТР способа вычисления теплоёмкостей сред, получаемая величина расчётной максимальной температуры рабочего тела является довольно грубым приближением – заменой реального поля температуры в объёме цилиндра, то в учебной практике целесообразнее применять более простой способ их вычисления.

Таким образом, определить величину КИВ, при которой достигается заданная максимальная температура рабочего тела  $T_z$  (в упрощённой модели рабочего цикла дизеля, которой является классический ТР), можно с помощью формулы (11б), а также ряда связанных с ней формул.

### Список литературы:

1. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – 13-е изд., испр. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
2. Быстроходные поршневые двигатели внутреннего сгорания / Н.Х. Дьяченко [и др.]; под ред. Н.Х. Дьяченко. – М.; Л.: Машгиз, 1962. – 360 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания : Учебник для вузов / А.С. Хачиян [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1985. – 312 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 400 с.
5. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – 4-е изд., стереотип. – М.: Высшая школа, 2008. – 496 с.



6. Лазарев Е.А. Конспект лекций по совершенствованию рабочих процессов в поршневых двигателях / Южно-Уральский гос. ун-т. – Челябинск, 2011. – 268 с.
7. Лиханов В.А., Девятьяров Р.Р. Расчет двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие. – 3-е изд., испр. и доп. – Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 96 с.
8. Лиханов В.А., Девятьяров Р.Р., Россохин А.В. Расчет двигателей тракторов и автомобилей: Учебное пособие. – Киров: Вятская ГСХА, 2019. – 97 с.
9. Стефановский А.Б. Расчёт параметров рабочего цикла, его показателей и номинальных показателей автотракторного дизеля. Расчётно-графическая работа : Учебное пособие по дисциплине «Тракторы и автомобили». – 2-е изд., испр. – Мелитополь, 2023. – 99 с.

## 1.4. РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

### РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

**Надточий Виктор Николаевич**

канд. техн. наук,  
Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
РФ, г. Воронеж

**Латко Владислав Владимирович**

студент,  
Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
РФ, г. Воронеж

**Левышкин Данила Сергеевич**

студент,  
Военный учебно-научный центр  
Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,  
РФ, г. Воронеж

### DEVELOPMENT OF A RADAR RECOGNITION ALGORITHM

**Victor Nadtochiy**

Candidate of Technical Sciences,  
Military Training and Research Center  
of the Air Force "Air Force Academy  
named after Professor N.E. Zhukovsky  
and Yu.A. Gagarin",  
Russia, Voronezh

**Vladislav Latko**

*Student,  
Military Training and Research Center  
of the Air Force "Air Force Academy  
named after Professor N.E. Zhukovsky  
and Yu.A. Gagarin",  
Russia, Voronezh*

**Danila Levyshkin**

*Student,  
Military Training and Research Center  
of the Air Force "Air Force Academy  
named after Professor N.E. Zhukovsky  
and Yu.A. Gagarin",  
Russia, Voronezh*

**Аннотация.** В статье рассматривается процесс создания алгоритма радиолокационного распознавания, а также исследуются ключевые факторы, влияющие на вероятность правильного опознавания объектов, включая выбор информационных признаков и методов обработки сигналов.

**Abstract.** The article discusses the process of creating a radar recognition algorithm, as well as examines the key factors affecting the probability of correct identification of objects, including the choice of information features and signal processing methods.

**Ключевые слова:** информационные признаки, вероятность правильного распознавания, алгоритмы принятия решения, показатели качества.

**Keywords:** information signs, probability of correct recognition, decision-making algorithms, quality indicators.

Радиолокационные системы (РЛС) – это эффективные устройства для наблюдения за обстановкой и обеспечения безопасности в воздушном пространстве. При этом главным направлением развития радиолокационных систем является модернизация систем распознавания. Отсюда вытекает, что ключевой задачей при создании алгоритма радиолокационного распознавания является повышение эффективности системы за счет использования информационных признаков. Чтобы оценить эффективность системы, применяют следующие показатели: матрица

условных вероятностей распознавания при разных условиях наблюдения; средний риск; средняя стоимость ошибок [1].

Матрица условных вероятностей распознавания представляется в следующем виде:

$$\|P_{ik}\|, i, k = \overline{1, M},$$

Здесь  $M$  – число классов целей,  $ik$  условная вероятность принятия решения о распознавании цели класса  $k$  при условии ее принадлежности классу  $i$ .

Следовательно, вероятность правильного распознавания целей отображается на главной диагонали матрицы. Распознавательный алгоритм должен быть направлен на увеличение этих значений.

С помощью стоимостей ошибок распознавания  $r_{ik}$  и заданных априорных вероятностях классов  $P_i$  можно вычислить среднюю стоимость по следующей формуле:

$$r = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N r_{ik} P_i P(k|i)$$

Для удобной оценки эффективности распознавания, на практике используются полная вероятность ошибки распознавания и полная вероятность правильного распознавания:

$$P_{\text{ош}} = \sum_{i=1}^M P_i (1 - P_{ii})$$
$$P_{\Pi} = \sum_{i=1}^n P_i P_{ii}$$

где  $P_i$  – априорных вероятностях классов  $i$ ,  $P_{ii}$  – условная вероятность правильного распознавания классов  $i$ .

### **Метрики оценки качества распознавания в машинном обучении**

В наши дни технологии машинного обучения широко применяются для решения научных задач, включая распознавание объектов. Чтобы оценить качество моделей и сравнить эффективность различных алгоритмов, используются специальные показатели [3].

Один из основных показателей качества – это аккуратность, которая представляет собой процент правильно классифицированных объектов от общего числа объектов:

$$A = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN}$$

где TP – количество объектов, для которых алгоритм принятия решений правильно определил их принадлежность к соответствующему классу; TN – количество объектов, которые действительно не относятся к рассматриваемому классу и это было корректно определено алгоритмом; FP – число случаев, когда алгоритм ошибочно указал на принадлежность объекта к классу (ложно-положительные результаты); FN – число ситуаций, в которых алгоритм неверно определил объект как не принадлежащий к данному классу (ложно-отрицательные решения).

Для оценки качества работы алгоритма на каждом из классов по отдельности введем метрики точность и полнота:

Точность – это показатель, который отражает долю истинно положительных результатов среди всех объектов, для которых был сделан положительный прогноз. Чтобы рассчитать точность, используют следующую формулу:

$$P = \frac{TP}{TP + FP}$$

Полнота – это метрика, которая отражает отношение количества верно классифицированных объектов к общему числу действительно положительных примеров. Она показывает, сколько положительных образцов было правильно распознано. Чем выше значение полноты, тем меньше положительных примеров было упущено при классификации.

$$R = \frac{TP}{TP + FN}$$

Решение, принимаемое алгоритмом, может состоять из одного или нескольких этапов. На каждом этапе алгоритм обязательно определяет метку класса цели из известного набора. Но в некоторых случаях одноэтапное принятие решения не гарантирует высокой точности, поэтому требуется многоэтапный подход для получения оценки [2].

Все алгоритмы принятия решений можно разделить на две группы по степени учёта статистических закономерностей признаков рас-

познавания: лингвистические и статистические. Лингвистические алгоритмы распознавания основаны на анализе описания цели в виде графа или цепочки символов.

В основе статистических алгоритмов лежит минимизация вероятности ошибочного распознавания. Среди них выделяют параметрические, непараметрические и нейросетевые алгоритмы машинного обучения.

Параметрические алгоритмы включают байесовские и небайесовские. Байесовские алгоритмы учитывают статистические характеристики параметров и вероятность распределения классов целей, в отличие от небайесовских. Данные о признаках получают через натурные эксперименты, математическое или физическое моделирование. В процессе распознавания алгоритм относит цели к определённому классу, используя наибольшую вероятность. Небайесовские алгоритмы не принимают во внимание априорные вероятности классов целей. Непараметрические алгоритмы синтезируются при неизвестных заранее конкретных статистических распределениях признаков целей различных классов. В некоторых конкретных случаях непараметрические методы могут быть рассмотрены как эвристическое упрощение байесовских алгоритмов.

Алгоритмы, основанные на использовании нейронных сетей, применяют математическую модель, имитирующую работу человеческого мозга. Она состоит из формальных нейронов, каждый из которых обрабатывает входные сигналы и выдаёт выходные. Благодаря параллельной работе всех элементов алгоритма значительно повышается эффективность распознавания.

Нейросетевые алгоритмы не только эффективно решают задачу распознавания, но и предоставляют гибкий метод обучения. Это позволяет системе адаптироваться к изменениям внешних условий или помеховой обстановки. Обучение избавляет от необходимости вручную выбирать ключевые признаки, определять их значимость и взаимосвязи [4].

Все вышеперечисленные алгоритмы отличаются друг от друга, поэтому для повышения вероятности правильного распознавания воздушных целей используют различные комбинации этих алгоритмов. Кроме того, применение данных методов может существенно улучшить показатели точности и информативности наличия большого числа выборов.

**Список литературы:**

1. Горелик, А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.В., Эпштейн С.С. Селекция и распознавание на основе локационной информации / под ред. А.Л. Горелика. – М.: Радио и связь, 1990. – 282 с.
2. Киселева Т.В., Маслова Е.В., Бычков А.Г. Машинное обучение для решения задач распознавания образов // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2021. – № 2 (18). – С. 19–24.
3. Соколов А.В. Объекты радиолокации. Обнаружение и распознавание. Коллективная монография. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2006. – 176 с.
4. Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2009. – 432 с.

## 1.5. ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ В РАСПЛАВАХ $\text{LiCl-KCl-CSCl-K}_2\text{SiF}_6$

**Парасотченко Юлия Александровна**

*младший научный сотрудник,  
Уральский федеральный университет,  
РФ, г. Екатеринбург*

**Гевел Тимофей Анатольевич**

*младший научный сотрудник,  
Уральский федеральный университет,  
РФ, г. Екатеринбург*

**Суздалъцев Андрей Викторович**

*доктор химических наук,  
заведующий лабораторией,  
Уральский федеральный университет,  
РФ, г. Екатеринбург*

### ELECTROCHEMICAL ANALYSIS OF SILICON CONCENTRATION IN $\text{LiCl-KCl-CSCl-K}_2\text{SiF}_6$ MELTS

**Yulia Parasotchenko**

*Researcher,  
Ural Federal University,  
Russia, Ekaterinburg*

**Timofey Gevel**

*Researcher,  
Ural Federal University,  
Russia, Ekaterinburg*

**Andrey Suzdaltsev**

*Dr. of Science, Laboratory head,  
Ural Federal University,  
Russia, Ekaterinburg*



**Аннотация.** Электроосаждение из расплавленных солей является одним из перспективных методов получения кремния заданной морфологии. В данной работе методами вольтамперометрии и спектрального анализа изучена возможность контроля концентрации ионов кремния в расплавах  $\text{LiCl-KCl-CsCl-K}_2\text{SiF}_6$ . На основании полученных результатов выбран состав хлоридного расплава с пониженным содержанием фтор-ионов для электроосаждения кремния.

**Abstract.** Electrodeposition from molten salts is one of the most promising methods for obtaining silicon of a required morphology. In this work, the possibility of controlling the concentration of silicon ions in  $\text{LiCl-KCl-CsCl-K}_2\text{SiF}_6$  melts is studied by voltammetry and spectral analysis methods. Based on the results obtained, the composition of chloride melt with reduced content of fluoride ions was selected for silicon electrodeposition.

**Ключевые слова:** кремний, электроосаждение, электрохимический анализ.

**Keywords:** silicon, electrodeposition, electrochemical analysis.

## Введение

Кремний находит все большее применение в различных сферах. Активно ведутся работы, направленные на разработку литий-ионных источников тока повышенной удельной мощности с анодами на основе субмикронных частиц кремния [Suzdaltsev A.]. Одним из перспективных методов получения кремния с заданной морфологией, размером частиц и составом микропримесей является электроосаждение из расплавленных солей. Для этого необходимо поддерживать концентрацию кремнийсодержащих электроактивных ионов в расплаве и их ионный состав, которые могут меняться в ходе длительного электролиза [Bieber A.L. et al.; Zaikov Yu.P. et al.].

В настоящей работе с использованием циклической вольтамперометрии и спектрального анализа изучено взаимодействие  $\text{K}_2\text{SiF}_6$  с хлоридным расплавом  $\text{LiCl-KCl-CsCl}$  в зависимости от его катионного состава. Полученные данные необходимы для экспериментального выбора состава хлоридного расплава с пониженным содержанием фтор-ионов для электроосаждения кремния заданной морфологии.

## Эксперимент

Для исследований были выбраны расплавы системы  $\text{LiCl-KCl-CsCl}$  с постоянным содержанием  $\text{KCl}$  и разным мольным соотношением  $\text{CsCl/LiCl}$ , приведенные в Таблице 1. Электролиты готовили из ин-

дивидуальных хлоридов чистотой выше 99.9 мас.%. Для очистки от остаточных примесей соли подвергали сушке, переплавке и зонной перекристаллизации. После приготовления все соли переносили в герметичный перчаточный бокс с атмосферой аргона, смешивали в необходимом соотношении и плавил. Гексафторсиликат  $K_2SiF_6$  очищали от примесей путем гидрофторирования.

Таблица 1.

**Температуры ликвидуса расплавов  
LiCl-KCl-CsCl [Songster, J. et al.]**

№	мол.%			$t_{\text{ликв}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{изм}}, ^\circ\text{C}$	Соотношение CsCl/LiCl
	LiCl	KCl	CsCl			
1	83,5	16,5	0	$\approx 535$	550	0
2	70	16,5	13,5	$\approx 440$	550	0.19
3	46,4	16,5	37,1	$\approx 320$	550	0.8
4	25,1	16,5	58,4	$\approx 485$	550	2.33
5	0	16,5	83,5	$\approx 625$	665	-

Изменение концентрации кремнийсодержащих электроактивных ионов в ходе взаимодействия  $K_2SiF_6$  с исследуемыми расплавами выполняли с использованием вольтамперного и спектрального анализа. Для этого после плавления смеси LiCl-KCl-CsCl с добавкой  $K_2SiF_6$  через равные промежутки времени на одинаковую глубину погружали рабочий электрод и фиксировали вольтамперную зависимость. Параллельно, после фиксации последней вольтамперной зависимости отбирали образец расплава для спектрального анализа содержания в нем кремния.

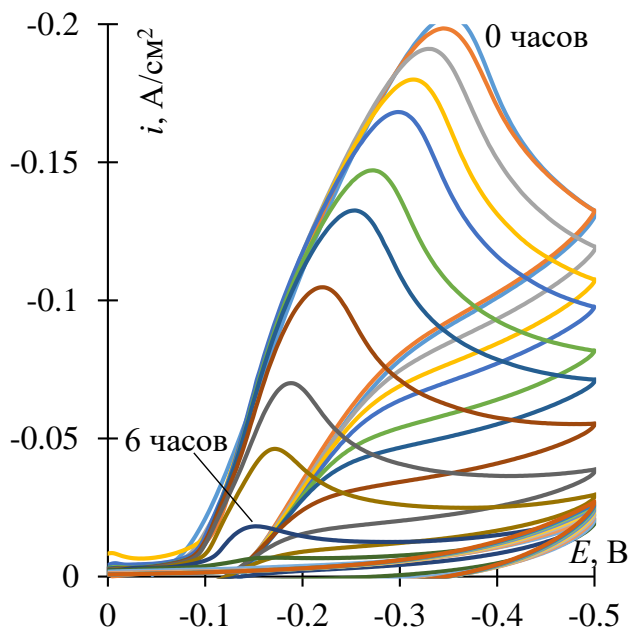
Электрохимические измерения проводили с использованием PGSTAT AutoLab 302N (Metrohm, Нидерланды) в трех-электродной ячейке, где в качестве рабочего электрода выступал стеклоуглерод, а в качестве противоэлектрода и квазиэлектрода сравнения – бруски поликристаллического кремния (99,95 %). Содержание кремния в образцах электролитов проводили методом ICP-AES с использованием атомно-эмиссионного спектрометра Plasma 3000 (NCS, Китай).

**Результаты и обсуждение**

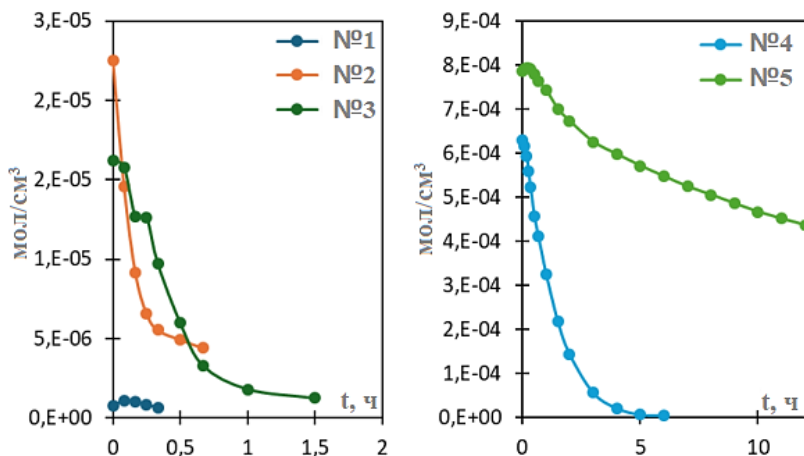
На Рис. 1 приведен набор вольтамперных зависимостей, зафиксированных для расплава №4 в Табл. 1. На зависимости, полученной для отметки «0 часов», был зафиксирован пик при потенциале около -0,37 В, характеризующий электровосстановление кремнийсодержащих ионов. В ходе изотермической выдержки расплава при 550°C величина

катодной плотности тока пика снизилась с 0,21 до 0,02 А/см<sup>2</sup>, а потенциал пика сместился в область положительных значений до -0,14 В.

Полученные наблюдения указывают на снижение концентрации электроактивных ионов в расплаве, которая после вольтамперных измерений составила  $1,28 \times 10^{-5}$  мол/см<sup>3</sup> по данным спектрального анализа. По изменению величин катодной плотности тока пика с учетом проанализированных значений концентрации электроактивных ионов были построены зависимости изменения концентрации кремнийсодержащих ионов в расплавах №№1-5 Таблицы 1, которые приведены на Рис. 2.



**Рисунок 1.** Вольтамперные зависимости, полученные на стеклоуглероде в ходе изотермической выдержки расплава  $\text{LiCl-KCl-CsCl}$  с 3 мас.%  $\text{K}_2\text{SiF}_6$



**Рисунок 2. Изменение мольной концентрации кремнийсодержащих ионов ходе изотермической выдержки расплавов  $\text{LiCl-KCl-CsCl}$  с 3 мас. %  $\text{K}_2\text{SiF}_6$**

Из Рис. 2 следует, что во всех исследуемых расплавах концентрация кремнийсодержащих ионов снижается, при этом повышение соотношения  $\text{CsCl/LiCl}$  способствует повышению их термической устойчивости.

### Выводы

В работе методами вольтамперометрии и спектрального анализа изучено влияние катионного состава расплава  $\text{LiCl-KCl-CsCl}$  на термическую устойчивость кремнийсодержащих ионов. Показано, что увеличение соотношения  $\text{CsCl/LiCl}$  в расплавах  $\text{LiCl-KCl-CsCl}$  приводит к снижению скорости разложения  $\text{K}_2\text{SiF}_6$  и большей концентрации кремнийсодержащих ионов в расплаве после изотермической выдержки при прочих равных условиях.

Предположительно это обусловлено перераспределением энергии связей между атомами в кремнийсодержащих ионах за счет повышения в расплавах концентрации катионов цезия.

По результатам измерений для электроосаждения кремния могут быть рекомендованы расплавы с большей долей хлорида цезия.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Russian Science Foundation № 23-23-00361, <https://rscf.ru/en/project/23-23-00361>.

### Список литературы:

1. Bieber, A.L. Fluoroacidity evaluation in molten salts / A.L. Bieber, L. Massot, M. Gibilaro [et al.] // *Electrochim. Acta.* – 2011. – V. 56. – P. 5022-5027.
2. Songster, J. Thermodynamic calculation of phase diagrams of the 60 common ternary systems containing cations Li, Na, K, Rb, Cs and anions F, Cl, Br, I / J. Songster, A. Pelton // *J. Phase Equilibria.* – 1991. – V. 12. – P. 511–537.
3. Suzdaltsev, A. Silicon electrodeposition for microelectronics and distributed energy: A mini-review / A. Suzdaltsev // *Electrochem.* – 2022. – V. 3. – P. 760-768.
4. Zaykov, Yu.P. Interaction between SiO<sub>2</sub> and a KF-KCl-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> melt / Yu.P. Zaykov, A.V. Isakov, I.D. Zakiryanova [et al.] // *J. Phys. Chem.B.* – 2014. – V. 118. – P. 1584-1588.

## **МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРООСАЖДЕННОГО КРЕМНИЯ**

***Трофимов Алексей Алексеевич***

*младший научный сотрудник,  
Уральский федеральный университет,  
РФ, г. Екатеринбург*

***Старкова Екатерина Юрьевна***

*инженер-исследователь,  
Уральский федеральный университет,  
РФ, г. Екатеринбург*

***Зырянова Екатерина Геннадьевна***

*инженер-исследователь,  
Уральский федеральный университет,  
РФ, г. Екатеринбург*

## **MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND CHEMICAL COMPOSITION OF ELECTRODEPOSITED SILICON**

***Aleksei Trofimov***

*Junior Researcher,  
Ural Federal University,  
Russia, Ekaterinburg*

***Ekaterina Starkova***

*Research engineer,  
Ural Federal University,  
Russia, Ekaterinburg*

***Ekaterina Zyryanova***

*Research engineer,  
Ural Federal University,  
Russia, Ekaterinburg*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования морфологических свойств и состава кремния, полученного методом электрохимического осаждения из расплавленных солей  $KCl-K_2SiF_6$ -

SiO<sub>2</sub>, а также влияние последующей обработки с использованием планетарной мельницы на примесный состав. Электроосаждение позволяет варьировать форму и размер частиц в диапазоне от 160 до 340 нм. Для получения наименьшего диаметра частиц необходимо использовать расплав без добавления SiO<sub>2</sub>.

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the morphological properties and composition of silicon obtained by electrochemical deposition from molten salts KCl-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>-SiO<sub>2</sub>. The results of subsequent processing using a planetary mill on the impurity composition are presented. Electrodeposition allows varying the shape and size of particles in the range from 160 to 340 nm. To obtain the smallest particle diameter, it is necessary to use a melt without adding SiO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** кремний, электроосаждение, волокна, иглы, морфология.

**Keywords:** silicon, electrodeposition, wires, needles, morphology.

## Введение

Кремний (Si) является одним из наиболее перспективных материалов для применения в анодах литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) благодаря своей высокой емкости (4200 мАч/г) [2], что в десять раз превосходит ёмкость традиционных графитовых анодов. Однако, использование кремния в коммерческих батареях ограничено рядом проблем, связанных с его низкой проводимостью, высоким коэффициентом расширения при литировании (до 400%) и вызванным этим разрушением его структуры в процессе циклирования.

Исследования показывают, что основной проблемой является именно механическая неустойчивость структуры кремниевых анодов при циклах зарядки и разрядки. При интеркаляции лития кремний увеличивается в размерах, что приводит к образованию трещин и потере электрического контакта между активным материалом и электродом, что, в свою очередь, снижает эффективность и емкостные характеристики аккумулятора. Современные подходы к решению данных проблем включают использование наноструктурированных форм кремния, композитных материалов [4], а также добавление полимерных связующих для улучшения механической прочности анодов. Одним из способов получения кремния субмикронных размеров является электроосаждение из расплавленных солей [1].

В данной статье представлено исследование морфологических свойств и химического состава кремния, полученного методом электр-

трохимического осаждения из расплавленных солей, а также влияние последующей обработки с использованием планетарной мельницы на химический состав.

### Экспериментальная часть

Для электроосаждения кремния использовали расплав  $KCl-K_2SiF_6$  (5% мас.) с и без добавления  $SiO_2$  (0.5% мас.). Для синтеза использовали герметичную стальную ячейку заполненную высокочистым аргонном. Осаждение кремния проводили на стеклоуглеродном электроде с использованием потенциостата Autolab PGSTAT 302N при постоянном потенциале -0.05, -0.15, -0.25 В относительно кремниевого электрода сравнения, противозлектрод – кремний. Потенциалы для осаждения выбирали на основе циклической вольтамперограммы.

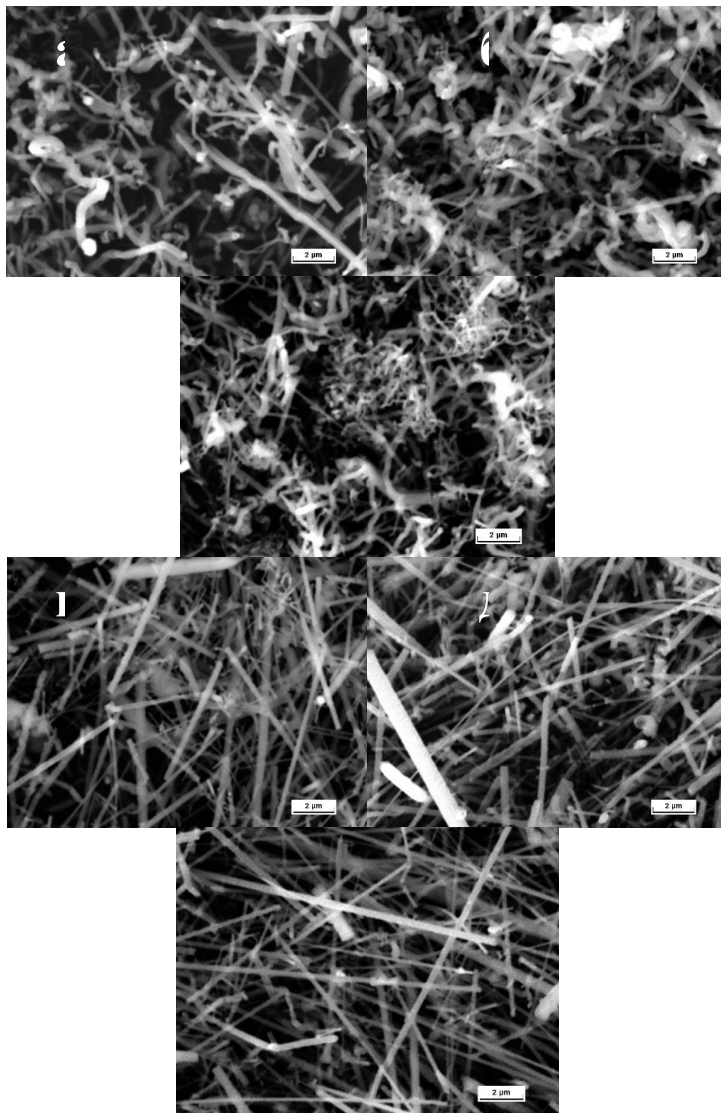
Морфологию образцов кремния изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 4. Для анализа химического состав полученных материалов использовали приставку для энергодисперсионного анализа Xplore 30 EDS в составе электронного микроскопа и метод атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой NCS Plasma 300.

Для помола материала использовали планетарную мельницу Pow-teq VM6 Pro, размольная фурнитура и шары изготовлены из диоксида циркония.

### Результаты и обсуждение

На Рис. 1 представлены фотографии синтезированных методом электроосаждения частиц кремния. Добавление в состав расплава  $SiO_2$  в небольших концентрациях (0.5 % мас.) приводит к изменению в морфологии и кремний осаждается преимущественно в виде иголок, а без добавки  $SiO_2$  образуются спутанные волокна.





**Рисунок 1. Микрофотографии образцов кремния  
электросажженного осажденного из расплава  $KCl$ ,  $K_2SiF_6$  (5 % мас.)  
при а)  $-0,05B$  б)  $-0,15B$  в)  $-0,25B$ ; из расплава  $KCl$ ,  $K_2SiF_6$  (5 % мас.)  
с добавлением 0.5% мас.  $SiO_2$  при г)  $-0,05B$  д)  $-0,15B$  е)  $-0,25B$**

Определение длины волокон в виду их спутанности невозможно, в качестве характеристического размера выбран диаметр частиц, представленные в таблицы 1 результаты приведены на основании 500-800 измерений для каждого образца.

**Таблица 1.**

**Средние характеристические размеры частиц кремния**

Образец	Условия получения	Е отн. Si, В	Размер, нм
1	KCl-K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (5% мас.)	-0,05	335±174
2		-0,15	266±103
3		-0,25	164±67
4	KCl-K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> – SiO <sub>2</sub> (0.5% мас.)	-0,05	286±132
5		-0,15	263±99
6		-0,25	219±102

Из данных таблицы 1 видно, что смещение потенциала стеклоуглеродного электрода от -0,05 до -0,25 В приводит к ожидаемому снижению размеров формируемых частиц кремния. Наименьший средний размер формируемых частиц достигается для волокон кремния, полученных из расплава KCl-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> без добавления SiO<sub>2</sub> при потенциале -0,25В , и составляет 164±67 нм.

С целью анализа примесных компонентов в составе полученного порошка использовали метод атомно-эмиссионной спектроскопии. Результаты анализа представлены в таблице 2.

**Таблица 2.**

**Результаты анализа методом атомно-эмиссионной спектроскопии примесных компонентов электроосажденного кремния до (столбец 2 и 3) и после (столбец 4) измельчения с использованием планетарной мельницы**

Элемент	Содержание примесей, ppm		
	Si KCl, K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	Si KCl, K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> , SiO <sub>2</sub>	Si ПМ KCl, K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>
Al	348	271	311
B	16	14	22
Cr	351	329	335
Co	27	51	41
Ni	1627	1247	1698
Fe	1674	1517	1679
Mn	1284	879	1371
K	1497	1792	1612

Элемент	Содержание примесей, ppm		
	Si KCl, K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>	Si KCl, K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> , SiO <sub>2</sub>	Si ПМ KCl, K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub>
Mo	425	411	449
Ca	18	27	38
Hf	-	-	486
Zr	-	-	9876

Как видно из представленных данных, состав расплава не оказывает значительного влияния на содержание примесей. Главным источником примесных элементов Fe, Ni, Cr, Mn является нержавеющая проволока, применяемая для крепления электродов к токоподводам из молибдена. Согласно литературным источникам наличие данных примесей не является препятствием для использования материалов в качестве анодных материалов литий-ионных источников тока [5], однако высокое их содержание может значительно снижать ёмкостные характеристики материала [6].

В связи со слабой циклируемостью синтезируемых материалов в исходном виде [3] и планами по дальнейшему синтезу композитов Si-C с использованием планетарной мельниц проведен помол полученного кремния в течение 1 часа в среде изопропилового спирта при 400 об/мин. Помол оказывает негативное влияние на содержание примесей в составе полученного порошка – компоненты размоленной фурнитуры (Zr, Hf) включаются в состав осадка и их содержание может достигать 1% мас.

### Выводы

Варьирование размеров частиц в расплаве KCl-K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> при изменении потенциала электроосаждения возможно только в довольно узких диапазонах и не позволяет добиться получения наноразмерных частиц без использования дополнительной обработки, наименьший средний диаметр полученных частиц составляет 164 нм. Анализ примесей в составе полученных осадков свидетельствует о включении в состав осадка элементов материалов токоподводов – суммарно до 1% мас., что при необходимости получения кремния чистотой выше 99% ведет к необходимости дополнительной кислотной обработки. Дополнительное измельчение с использованием планетарной мельницы и размоленной фурнитуры из ZrO<sub>2</sub> ведет к включению Zr и Hf в состав осадка в значительном количестве.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках соглашения №075-03-2024-009/1 от 15.02.2024 (номер темы в ЕГИСУ НИОКТР – FEUZ-2020-0037).

### Список литературы:

1. Гевел Т.А. Электроосаждение кремния из расплава  $KCl-CsCl-K_2SiF_6$  / Т.А. Гевел, С.И. Жук, Н.М. Леонова [и др.] // Расплавы. – 2022. – №4. – С. 350-361. 3 была
2. Chan C. High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires / C. Chan, H. Peng, G. Liu. [et al.] // Nature nanotechnology. – 2008. – V. 4. – P. 31-35.
3. Gevel T. Electrochemical synthesis of nano-sized silicon from  $KCl-K_2SiF_6$  melts for powerful lithium-ion batteries / T. Gevel, S. Zhuk, N. Leonova [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – V. 11. – № 10927. 6 была
4. Li P. Diverting Exploration of Silicon Anode into Practical Way: A Review Focused on Silicon-Graphite Composite for Lithium Ion Batteries / P. Li, Kim H., Myung S., Sun Y. // Energy Storage Materials. – 2021. – V. 35. – P. 550-576
5. Nulu A., Nulu V., Sohn K. Influence of transition metal doping on nano silicon anodes for Li-ion energy storage applications // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – V. 911. – №164976.
6. Zong L. Nanopurification of silicon from 84% to 99.999% purity with a simple and scalable process / L. Zong, B. Zhu, Z. Lu, Y. Tan // PNAS. – 2015. – V. 112. – P. 13473-13477.

## **ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

### **РАЗДЕЛ 2.**

### **ФИЗИКА**

#### **2.1. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

#### **КАЛИБРОВКА АКТИВНОСТИ В 2П ЭТАЛОННОГО БЕТА-ИСТОЧНИКА $^{60}\text{Co}$ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ GEANT4**

***Лавский Василий Юрьевич***

*ведущий инженер,*

*Специализированный Научно-Исследовательский*

*Институт Приборостроения (АО "СНИИП"),*

*РФ, г. Москва*

***Самойлова Елена Михайловна***

*канд. техн. наук, доц.,*

*кафедры "Техническая механика и мехатроника"*

*Института машиностроения*

*материаловедения и транспорта*

*Саратовского государственного технического*

*университета имени Гагарина Ю.А.,*

*РФ, г. Саратов*

## CALIBRATION OF $2\pi$ ACTIVITY OF THE REFERENCE BETA SOURCE 6C0 USING GEANT4 SOFTWARE

**Vasily Lavsky**

*Leading engineer,  
Specialized Scientific Research Institute  
of Instrument Engineering (JSC "SNIP"),  
Russia, Moscow*

**Elena Samoilova**

*Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor, Department  
of Technical Mechanics and Mechatronics,  
Institute of Mechanical Engineering,  
Materials Science and Transport Saratov  
State Technical University named after Yuri Gagarin,  
Russia, Saratov*

**Аннотация.** В данной статье приведена калибровка активности в  $2\pi$  эталонного бета-источника 6C0 для проведения последующего моделирования отклика счетчика СИ502БГ.

**Abstract.** This article presents the calibration of the  $2\pi$  activity of the 6C0 reference beta source for subsequent modeling of the SI502BG counter response.

**Ключевые слова:** эталонный источник 6C0, Geant4.

**Keywords:** reference source 6C0, Geant4.

В настоящее время все большую популярность в научных кругах набирает моделирование физических процессов, предсказание которых посредством проведения инженерных расчетов довольно трудоемко. В атомной отрасли, в частности, в области детектирования ионизирующих излучений, моделирование физических процессов носит по большей части прикладной характер.

Разработанное устройство должно соответствовать всем своим заявленным параметрам, которые должны подтверждаться при проведении испытаний, однако проведение натуральных испытаний для некоторых устройств не просто дорого, но и крайне затруднительно с технической точки зрения. В таких случаях вместо проведения испытаний технический параметр подтверждается путем выполнения инженерных расчетов с последующим проведением моделирования. В ядерной фи-

зике моделирование выполняется в таких программах как Geant4 [1], FLUKA и MCNP.

Зачастую, для обработки полученных результатов используют программу ROOT [2], которая на настоящий момент является платформой для обработки данных в физике высоких энергий.

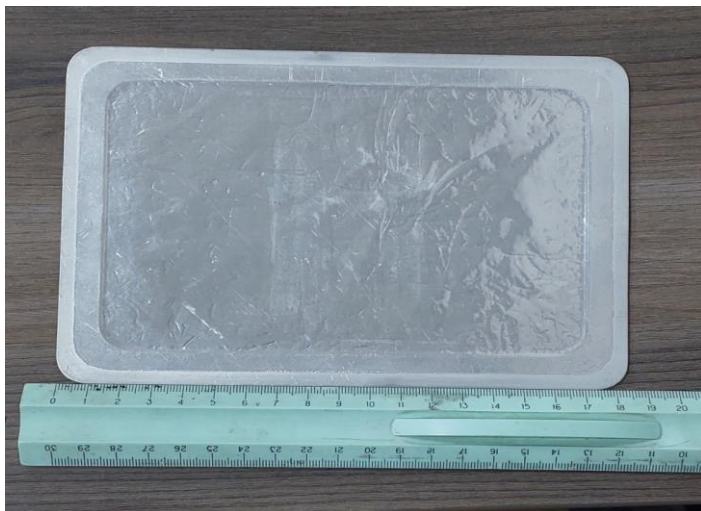
Задача моделирования состоит в калибровке активности эталонного бета-источника  $^{60}\text{Co}$  для подготовки к последующей калибровке модели путем сравнения отклика счетчика СИ502БГ с ранее полученными экспериментальными данными.

В данной работе представлены результаты, которые были получены при моделировании эксперимента по получению средней скорости счета на выходе со счетчика СИ502БГ при помещении его возле активной области эталонного бета-источника  $^{60}\text{Co}$ , имеющего нуклидный состав  $\text{Sr}^{90}$  и  $\text{Y}^{90}$ .

Ввиду того, что в используемом ПО отсутствует привязка к реальному времени, калибровка активности эталонного источника  $^{60}\text{Co}$ , изображенного на рис.1, заключается в определении времени проведения измерения.

Для калибровки активности эталонного источника  $^{60}\text{Co}$  вплотную к нему устанавливался чувствительный объем, как это показано на рис.2. Указанный чувствительный объем был описан исключительно с целью калибровки активности эталонного источника в 2л. После определения времени измерения указанный чувствительный объем исключался из конструктива модели.

В процессе определения времени измерения в конструкции эталонного источника генерировалось два бета-спектра, максимальные энергии которых соответствовали максимальным энергиям распада  $\text{Sr}^{90}$  и  $\text{Y}^{90}$ . Ввиду того, что указанные нуклиды находятся в радиационном равновесии и их активности равны, генерировалось одинаковое количество бета-частиц для каждого из спектров. Нуклиды  $\text{Sr}^{90}$  и  $\text{Y}^{90}$  находятся в радиационном равновесии в соответствии с приведенными реакциями:  $\text{Sr}^{90} \rightarrow \text{Y}^{90} + \beta^- + \bar{\nu}_e$  и  $\text{Y}^{90} \rightarrow \text{Zr}^{90} + \beta^- + \bar{\nu}_e$ , причем  $T_{1/2}(\text{Sr}^{90}) = 28,79$  лет и  $T_{1/2}(\text{Y}^{90}) = 64$  часа.



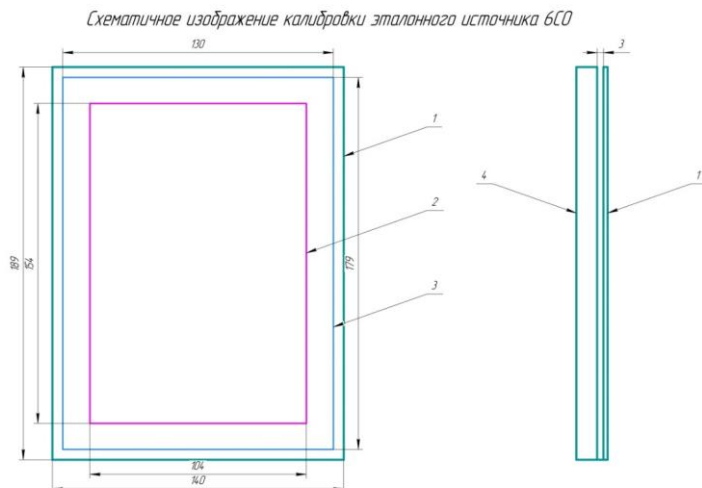
**Рисунок 1. Фотография эталонного бета-источника  $^{60}\text{Co}$  со стороны активной области**

При расчете времени измерения количество событий, зарегистрированных в чувствительном объеме, делилось на активность используемого эталонного бета-источника  $^{60}\text{Co}$  в 2л. Учитывались только события, имеющие энергию 50 кэВ или выше. Таким образом:

$$t_{\text{изм}} = \frac{N_{\text{генератор}}}{A_{^{60}\text{Co}}}, \quad (1)$$

где:  $t_{\text{изм}}$  – время измерения;  $N_{\text{генератор}}$  – количество электронов, попавших в чувствительный объем для калибровки эталонного источника  $^{60}\text{Co}$  и имеющих энергию больше 50 кэВ;  $A_{^{60}\text{Co}}$  – активность используемого эталонного бета-источника  $^{60}\text{Co}$ .





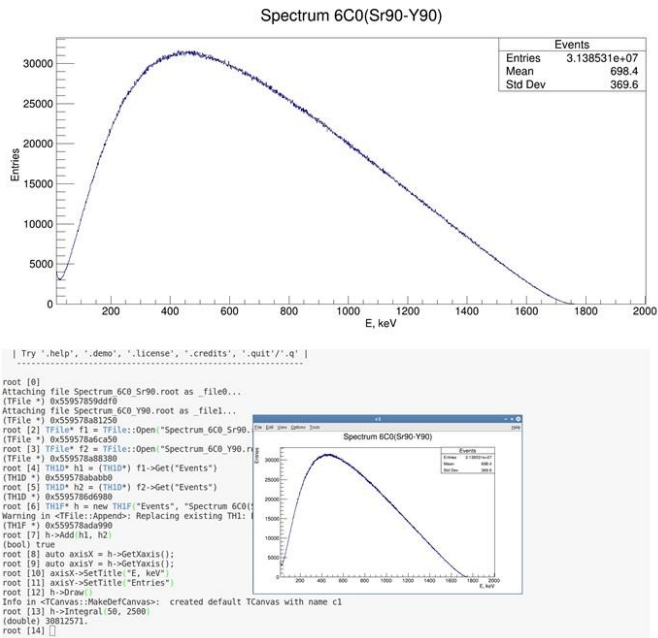
**Рисунок 2. Схематичное изображение калибровки эталонного источника  $^{60}\text{Co}$  [3], где: 1 – алюминиевая подложка, представляющая собой основу конструкции эталонного источника, 2 – активная область источника, где происходит генерация бета-спектров, 3 – алюминиевая герметизирующая фольга, 4 – объем для калибровки активности эталонного источника  $^{60}\text{Co}$**

Для уменьшения погрешности моделирования при калибровке чувствительного объема счетчика СИ502БГ было принято решение о необходимости введения условия  $t_{\text{изм}} \geq 10^3 \text{ с}$ , при выполнении которого набирается достаточная статистика для оптимально точной калибровки модели. После компиляции модели был визуализирован спектр, обозначенный на рис.3, отобраны события и высчитано время измерения  $t_{\text{изм}}$ , которое указано в Таблице 1.

**Таблица 1.**

**Результат калибровки активности эталонного источника  $^{60}\text{Co}$  в 2π**

$N_0(\text{Sr}^{90})$	$N_0(\text{Y}^{90})$	$N_{\text{генератор}}$	$A_{^{60}\text{Co}}, \text{с}^{-1}$	$t_{\text{изм}}, \text{с}$
$10^8$	$10^8$	30812571	$1,153 \cdot 10^4$	2 672,4



**Рисунок 3. Спектр бета-частиц, полученный на выходе с эталонного бета-источника 6C0, при генерации внутри активной области  $10^8$  электронов для каждого нуклида ( $Sr^{90}$  и  $Y^{90}$ )**

## Вывод

В процессе моделирования эталонного бета-источника 6C0, содержащего нуклиды  $Sr^{90}$  и  $Y^{90}$ , удалось реализовать генерацию бета-спектра, энергетический спектр которых соответствует форме реального бета-спектра от эталонного бета-источника. Таким образом можно утверждать, что модель подготовлена к проведению калибровок.

## Список литературы:

1. Официальный сайт используемого ПО для моделирования ядерных процессов (Geant4): <https://geant4.org/>;
2. Официальный сайт используемого ПО для обработки полученных результатов (ROOT): <https://root.cern/>;
3. Каталог изготовителей эталонных бета источников <http://www.isotop.ru/files/treecontent/nodes/attaches/700/704/1c0-6c0new.pdf>

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА СЧЕТЧИКА СИ502БГ В СРЕДЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ GEANT4**

***Лавский Василий Юрьевич***

*ведущий инженер,*

*Специализированный Научно-Исследовательский*

*Институт Приборостроения (АО "СНИИП"),*

*РФ, г. Москва*

***Самойлова Елена Михайловна***

*канд. техн. наук, доц.,*

*кафедры "Техническая механика и мехатроника"*

*Института машиностроения*

*материаловедения и транспорта*

*Саратовского государственного технического*

*университета имени Гагарина Ю.А.,*

*РФ, г. Саратов*

## **MODELING THE RESPONSE OF THE SI502BG COUNTER IN THE GEANT4 SOFTWARE**

***Vasily Lavsky***

*Leading engineer,*

*Specialized Scientific Research*

*Institute of Instrument Engineering (JSC "SNIP"),*

*Russia, Moscow*

***Elena Samoilova***

*Candidate of Technical Sciences,*

*Associate Professor, Department*

*of Technical Mechanics and Mechatronics,*

*Institute of Mechanical Engineering,*

*Materials Science and Transport Saratov*

*State Technical University named after Yuri Gagarin,*

*Russia, Saratov*

**Аннотация.** В данной статье приведены результаты моделирования отклика счетчика СИ502БГ в ответ на поток бета-частиц, вылетающих из размещенного возле него эталонного бета-источника. В статье наглядно показан процесс калибровки чувствительного объема методом последовательных приближений. Полученные результаты

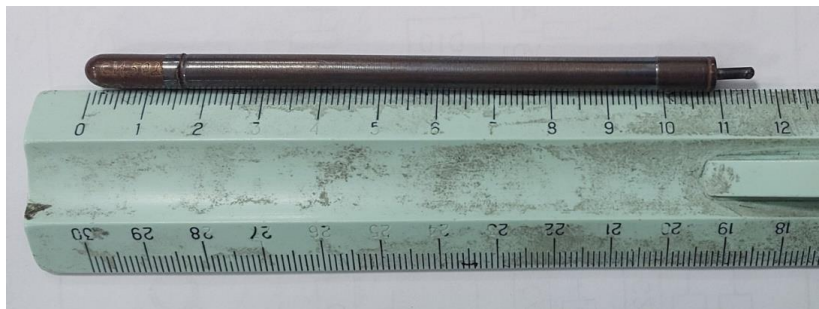
будут лежать в основе верификации результатов, полученных в дальнейшем при использовании этого проекта в Geant4.

**Abstract.** This article presents the results of modeling the response of the SI502BG counter to a beta-particle flux emitted from a reference beta-source placed near it. The article clearly shows the process of calibrating the sensitive volume using the method of successive approximations. The obtained results will form the basis for verifying the results obtained in the future when using this project in Geant4.

**Ключевые слова:** счетчик СИ502БГ, Geant4, калибровка модели, верификация результатов.

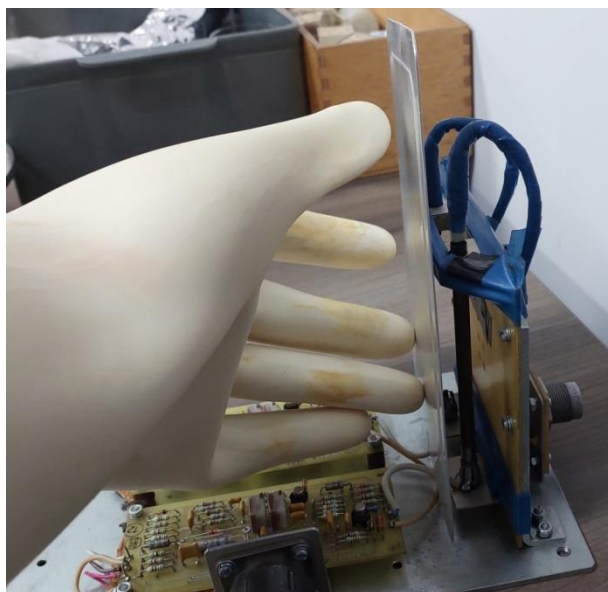
**Keywords:** SI502BG counter, Geant4, model calibration, verification of results.

В данной работе представлены результаты моделирования эксперимента по получению средней скорости счета на выходе со счетчика СИ502БГ при помещении его возле активной области эталонного бета-источника  $^{60}\text{Co}$ , имеющего нуклидный состав  $\text{Sr}^{90}$  и  $\text{Y}^{90}$ . Основная цель проведения калибровки данной модели в Geant4 [1] с обработкой полученных результатов в программе ROOT [2] состоит в верификации результатов, которые будут получены при прохождении бета-частиц с большими энергиями через вещество. Таким образом, в результате проведения этого моделирования должен быть окончательно сформирован физический лист и откалибрована чувствительная область счетчика. В дальнейшем планируется проведение моделирования прохождения через вещество бета-спектров с максимальной энергией от 3 МэВ до 10,4 МэВ, причем в качестве детектора будет задействован счетчик СИ502БГ, фотография которого представлена на рис.1 с откалиброванным чувствительным объемом. Следует отметить, что калибровка проводилась с опорой на экспериментальные данные и лежит в основе верификации дальнейших результатов, которые будут получены в этой модели. Фотографии проведения эксперимента по определению скорости счета от эталонного бета-источника  $^{60}\text{Co}$  представлены на рис.2 и рис.3.



**Рисунок 1. Фотография счетчика СИ502БГ**

Как уже упоминалось ранее, калибровка модели состоит в изменении чувствительного объема смоделированного счетчика с целью изменения его чувствительности и приближении чувствительности смоделированного счетчика СИ502БГ к его реальным техническим параметрам.

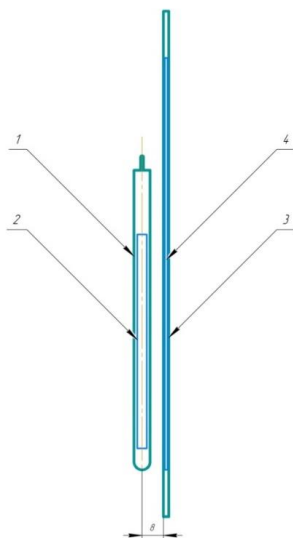


**Рисунок 2. Фотография установки, где проводились измерения скорости счета со счетчика СИ 502БГ вблизи активной области эталонного бета-источника 6С0**

Эксперимент по определению скорости счета на выходе со счетчика СИ502БГ от эталонного бета-источника 6С0 проводился следующим образом: на стол вертикально устанавливался эталонный бета-источник, вблизи активной области которого устанавливался счетчик СИ502БГ. Причем ось симметрии счетчика параллельна плоскости бета-источника и располагалась на расстоянии 8 мм от поверхности фольги, герметизирующей бета-источник.

В результате такого расположения счетчика СИ502БГ относительно бета-источника, счетчик находился в равномерно распределенном потоке бета-частиц, насколько это вообще возможно с бета-излучателями такого типа. В результате проведенного эксперимента была получена средняя скорость счета, опираясь на которую проводилась калибровка модели. Указанная калибровка представляет собой основную часть верификации полученных результатов.

*Схематичное изображение калибровки модели*

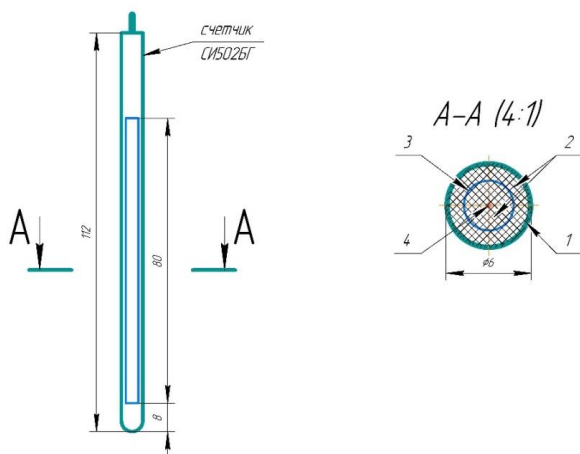


**Рисунок 3. Схематичное изображение калибровки модели.  
Обозначения: 1 – счетчик СИ502БГ; 2 – чувствительный объем  
счетчика СИ502БГ; 3 – подложка эталонного источника 6С0;  
4 – активная область эталонного источника**

Изначально чувствительный объем имел форму цилиндра с радиусом, равным внутреннему радиусу счетчика и длиной, равной длине анода счетчика, как это указано на рис.4. Однако в процессе калибровки методом последовательных приближений изменялся его объем посредством уменьшения диаметра, чем достигается уменьшение чувствительности счетчика. Таким образом, поэтапное уменьшение чувствительности счетчика приближало среднюю скорость счета, получаемую при компиляции модели к скорости счета, получаемой при проведении реального эксперимента.

Ввиду физических особенностей процессов регистрации бета-излучения с применением газоразрядного счетчика, работающего в режиме Гейгера-Мюллера, регистрация бета-частиц происходит только в том случае, если внутри счетчика в чувствительном объеме возникнут электроны с энергией 50 кэВ или более. Последнее условие является гарантией того, что зарегистрированная бета-частица ионизирует область вокруг анода счетчика СИ502БГ, что станет причиной появления на выходе со счетчика электронного импульса, амплитуды которого будет достаточно для прохождения через отсекающий порог, установленный в обрабатывающей аппаратуре.

*Схематичное изображение счетчика СИ502БГ*



**Рисунок 4. Конструктив счетчика СИ502БГ: 1 – стальной корпус счетчика СИ502БГ; 2 – газовое наполнение счетчика СИ502БГ; 3 – чувствительный объем счетчика СИ502БГ; 4 – анод**

Ввиду указанных выше особенностей используемого ПО, методика вычисления средней скорости счета импульсов от счетчика СИ502БГ иная, нежели при проведении реального эксперимента. После определения времени измерения  $t_{изм}$ , приведенное в Таблице 1, происходят две точно такие же генерации, но теперь в качестве чувствительного объема выступает чувствительный объем счетчика СИ502БГ, а чувствительный объем для калибровки активности эталонного источника  $^{60}Co$  исключен из модели.

После сбора статистики и отбора значимых событий по энергии вычисляется средняя скорость счета по формуле (2):

$$n_{вых\_СИ502БГ} = \frac{N_{дет\_СИ502БГ}}{t_{изм}}, \quad (2)$$

где:  $n_{вых\_СИ502БГ}$  – скорость счета, получаемая на выходе от счетчика СИ502БГ;  $N_{дет\_СИ502БГ}$  – количество электронов, попавших в чувствительный объем счетчика СИ502БГ с энергией выше 50 кэВ;  $t_{изм}$  – время измерения.

После упоминания некоторых технических особенностей газоразрядных счетчиков, используемого ПО и нахождения скорости счета, получаемой на выходе от счетчика, имеет смысл ввести коэффициент калибровки счетчика СИ502БГ:

$$K_{калибр\_СИ502БГ} = \frac{n_{эксп\_СИ502БГ}}{n_{вых\_СИ502БГ}}, \quad (3)$$

где:  $K_{калибр\_СИ502БГ}$  – коэффициент калибровки счетчика СИ502БГ;  $n_{эксп\_СИ502БГ}$  – средняя скорость счета на выходе со счетчика СИ502БГ, полученная экспериментально;  $n_{вых\_СИ502БГ}$  – скорость счета, получаемая на выходе со счетчика СИ502БГ в результате работы модели.

Т.к. искомая скорость счета получилась в результате проведения нескольких итераций, введем закон изменения коэффициента калибровки в зависимости от номера итерации ( $i$ ):

$$K_{калибр\_СИ502БГ}(i + 1) = K_{калибр\_СИ502БГ}(i) \cdot \frac{n_{эксп\_СИ502БГ}}{n_{вых\_СИ502БГ}(i)} \quad (4)$$

Относительная погрешность скорости счета, получаемая при калибровке чувствительного объема счетчика СИ502БГ:

$$\Phi_{СИ502БГ} = \left| \frac{n_{вых\_СИ502БГ}}{n_{эксп\_СИ502БГ}} - 1 \right| \cdot 100\% \quad (5)$$



Посредством выражений (4) и (5) были проведены итерации калибровки чувствительного объема счетчика СИ502БГ, результаты которых приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

**Калибровка чувствительного объема счетчика СИ502БГ методом последовательных приближений**

$i$	$K_{\text{калибр\_СИ502БГ}}(i)$	$N_{\text{дет\_СИ502БГ}}$	$n_{\text{вых\_СИ502БГ}}(i), \text{с}^{-1}$	$\Phi_{\text{СИ502БГ}}, \%$
0	1	658964	246,58	44,2
1	0,6934831041	519971	194,57	13,8
2	0,6094753086	468793	175,42	2,60
3	0,5941185599	459725	172,03	0,60

### Вывод

Результат моделирования эксперимента по калибровке чувствительного объема счетчика СИ502БГ с довольно хорошей погрешностью совпадает с результатом, полученным при проведении эксперимента. Т.о. описанный физический лист учитывает необходимый объем физических процессов, происходящих при помещении счетчика в область пролегания треков бета-частиц, выходящих из активной области эталонного источника  $^{60}\text{Co}$ . Как итог, сформированная модель может быть использована в качестве расчета прохождения бета-спектров через вещество.

### Список литературы:

1. Официальный сайт используемого ПО для моделирования ядерных процессов (Geant4): <https://geant4.org/>;
2. Официальный сайт используемого ПО для обработки полученных результатов (ROOT): <https://root.cern/>.

*ДЛЯ ЗАМЕТОК*

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

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

№ 12 (80)  
Декабрь 2024 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 05.12.24. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 4,125. 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