

Санкт-Петербург

Том 31, №3, 2025



ISSN 2782-6724

# Глобальная энергия

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

# ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Александров М.Л., член-корр. РАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Москва, Российская Федерация;

Клименко А.В., академик РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», НИТУ «МИСиС», Москва, Российская Федерация;

Костюк В.В., академик РАН, Российской академия наук, Москва, Российской Федерации;

Лагариков А.Н., академик РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики ОИВТ РАН, Москва, Российской Федерации;

Окрепилов В.В., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Рудской А.И., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Забоин В.Н., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Калеев И.А., д-р техн. наук, академик РАН, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация;

Колсун Михал, профессор, Технический университет, Кошице, Словакия;

Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Куколов М.И., д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Митиков А.В., д-р техн. наук, профессор, Университет Турку, Турку, Финляндия;

Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор, Бранденбургский технический университет, Бранденбург, Германия;

Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор, Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша;

Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS Division, ITW-India (P) Ltd, Бангалор, Индия;

Тендер М.Б., PhD, ин. член РАН, KTH Royal Institute of Technology, Стокгольм, Швеция;

Титков В.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации;

Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, Российская Федерация;

Цеменко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российской Федерации.

Журнал «Глобальная Энергия» (ранее «Материаловедение. Энергетика») с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сетевое издание открытого доступа публикует статьи высокого научного уровня, освещающие передовой опыт, результаты НИР, теоретические и практические проблемы энергетики, электротехники, материаловедения и металлургии.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory», в базах данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, в научной электронной библиотеке КиберЛенинка.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Учредитель и издатель: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Редакция журнала

О.А. Матенев – ответственный секретарь;

А.А. Кононова – компьютерная вёрстка; И.Е. Лебедева – перевод на английский язык; Ф.К.С. Бастиан – редактор.

Адрес редакции: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Тел. редакции +7 (812) 294-22-86, e-mail редакции: ntv-nauka@spbstu.ru

Дата выхода: 30.09.2025

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025

St. Petersburg

31 (3) 2025



ISSN 2782-6724

# Global Energy

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation  
St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great

## GLOBAL ENERGY

### EDITORIAL COUNCIL

*Sergeev V.V.* — head of the editorial council, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, corresponding member of the RAS, Russia;

*Aleksandrov M.L.* — corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

*Klimenko A.V.* — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

*Kostiuk V.V.* — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

*Lagar'kov A.N.* — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

*Okrepilov V.A.* — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

*Rudskoy A.I.* — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

*Fedorov M.P.* — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia.

### EDITORIAL BOARD

*Sergeev V.V.* — editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, corresponding member of the RAS, Russia;

*Kondrat'ev S.Yu.* — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Aksenov L.B.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Bashkarev A.Ya.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Borovkov A.I.* — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Gordeev S.K.* — Doctor of Technical Sciences, prof. CNIIM, Russia;

*Zaboin B.N.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Kayaev I.A.* — full member of the Russian Academy of Sciences, Russia;

*Kolcun Michal* — Ph.D., Technical University of Kosice, Slovak Republic;

*Korovkin N.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Kukolev M.I.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Mityakov A.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the University of Turku, Turku, Finland;

*Michailov V.G.* — Doctor of Technical Sciences, prof. BTU, Germany;

*Raychik Ya.* — Doctor of Technical Sciences, prof. Czestochowa Polytecnic University, Poland;

*Ramasubbu S.* — PhD, Lifetime Fellow, Indian Academy of Science, Research Director BISS, ITW-India (P) Ltd, India;

*Tandler M.B.* — foreign member of the Russian Academy of Sciences, KTH Royal Institute of Technology, Sweden;

*Titkov V.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Tolochko O.V.* — Doctor of Technical Sciences, prof. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

*Fokin G.A.* — Doctor of Technical Sciences, General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg», Russia;

*Tsemenko V.N.* — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Global Energy (formerly Materials Science. Power Engineering) has been published since 1995 under the scientific and methodical guidance of RAS since 1995.

Since 2002, the journal has been included in the List of leading peer-reviewed scientific journals compiled by the Higher Attestation Commission.

The online fully open-access journal focuses on the latest research in theoretical and practical aspects of power engineering, electrical engineering, materials science and metallurgy, striving to publish high-quality studies in these fields.

The journal is indexed by the following databases: VINITI Database RAS, Ulrich's Periodicals Directory, Russian Science Citation Index (RSCI), Google Scholar, EBSCO, ProQuest, ROAD, Index Copernicus, CNKI, RSCI (WoS), DOAJ, CyberLeninka.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (ROSKOMNADZOR), Certificate ЭЛ № ФС 77-78004 issued March 27, 2020.

Editorial office

O.A. Matenev — editorial manager;

A.A. Kononova — computer layout; I.E. Lebedeva — English translation; Ph.Ch.S. Bastian — editor.

Address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

+7 (812) 294-22-86, e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Release date: 30.09.2025

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025



## Содержание

### Энергетика. Электротехника

Пасека В.А., Коровкин Н.В. Моделирование и сравнительный анализ систем гибридной выработки электроэнергии с хранением на основе водорода и сжатого воздуха.....	7
Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г., Гришин Н.В. Оценка эффективности систем воздушного охлаждения турбогенераторов.....	22

### Металлургия. Материаловедение

Новиков П.А., Цветкова Г.В., Попович А.А. Оценка эффективности различных проводящих добавок в литий-ионных батареях для применения в высокомощных устройствах.....	45
Нечаев Д.В., Ермаков Б.С., Швецов О.В. Разработка метода прогнозирования реального срока эксплуатации надземной части свайной полимерной композитной трубы в летний период в условиях Крайнего Севера.....	60
Кузнецов Р.В., Теплухин В.Г., Ольховик Е.О. К вопросу упрочнения высоконагруженных деталей, работающих в узлах трения судовых дизелей.....	74
Золотарев А.М., Нефёдова В.А., Барабаш А.Л., Полозов И.А., Попович А.А. Исследование процесса селективного лазерного плавления для сплава ВЖ159 с добавлением наночастиц TiB <sub>2</sub> . Анализ пористости и микротвердости.....	86
Зайцев А.И., Сотов А.В., Абдрахманова А.Э., Попович А.А. Получение полимер-керамических и керамических материалов на основе силиката циркония (ZrSiO <sub>4</sub> ) методом послойного наплавления филамента (FDM-технология).....	98
Новиков П.А., Цветкова Г.В., Попович А.А. Изучение эволюции структуры катодного материала LiNi <sub>0,8</sub> Co <sub>0,1</sub> Mn <sub>0,1</sub> O <sub>2</sub> в условиях циклирования с перезарядом с применением <i>in-situ</i> дифракции рентгеновских лучей.....	107



# Contents

## Energetics. Electrical engineering

- Paseka V.A., Korovkin N.V.** Modeling and comparative analysis of hybrid electric power generation using hydrogen and compressed air energy storages..... 7

- Kartashova T.N., Prokofev A.Yu., Filin A.G., Grishin N.V.** Analysis of the efficiency of air-cooled turbogenerators..... 22

## Metallurgy. Material Science

- Novikov P.A., Tsvetkova G.V., Popovich A.A.** Effectiveness evaluation of various conductive additives in lithium-ion batteries for use in high-power devices..... 45

- Nechaev D.V., Ermakov B.S., Shvetsov O.V.** Development of a predictive method for actual service life estimation of the above-ground part of a pile polymer composite pipe in the summer period in extreme Northern conditions..... 60

- Kuznetsov R.V., Teplukhin V.G., Olkhovik E.O.** On strengthening methods for highly loaded components operating in friction units of marine diesel engines..... 74

- Zolotarev A.M., Nefyodova V.A., Barabash A.L., Polozov I.A., Popovich A.A.** Investigation of the selective laser melting process for VZh159 alloy with TiB<sub>2</sub> nanoparticle addition. Analysis of porosity and microhardness..... 86

- Zaytsev A.I., Sotov A.V., Abdurakhmanova A.E., Popovich A.A.** Production of polymer-ceramic and ceramic materials based on zirconium silicate (ZrSiO<sub>4</sub>) using the fused deposition modeling (FDM-technology)..... 98

- Novikov P.A., Tsvetkova G.V., Popovich A.A.** Study of evolution of the structure of the cathode material LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.1</sub>Mn<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub> under conditions of cycling with recharging using *in-situ* X-ray diffraction..... 107



# Энергетика. Электротехника

## Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 620.92

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31301>



В.А. Пасека<sup>✉</sup>, Н.В. Коровкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> [paseka.va@gmail.com](mailto:paseka.va@gmail.com)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ГИБРИДНОЙ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ХРАНЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА И СЖАТОГО ВОЗДУХА

**Аннотация.** Прогресс в рациональном использовании энергии подразумевает отказ от ископаемого топлива, и переход к использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) неизбежен в текущем сценарии глобального потепления. Эффективное использование ВИЭ в энергетике возможно только с параллельным использованием систем аккумулирования энергии. Водород как перспективный энергоноситель открывает широкие возможности для создания эффективных и надежных систем хранения энергии, способных повысить стабильность и экономическую окупаемость альтернативной энергетики. Статья посвящена вопросам моделирования гибридной системы хранения энергии на основе водорода. Описаны блоки моделей электролизера, бака-накопителя и топливного элемента (ТЭ). Проведен анализ работы ТЭ в условиях переменного спроса и избыточной мощности, а также представлены результаты имитационного моделирования в ПК MATLAB/Simulink. Предложенная модель позволяет эффективно управлять балансом между генерацией и потреблением энергии в условиях нестабильности ВИЭ и обеспечивать надежное энергоснабжение в период дефицита генерации за счет обратного преобразования водорода в электричество. Выполнено сравнение эффективности использования хранения электроэнергии на основе водорода и сжатого воздуха.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, системы накопления электрической энергии, водородный накопитель, гибридная энергосистема, математическое моделирование, топливный элемент, электролизер.

**Для цитирования:**

Пасека В.А., Коровкин Н.В. Моделирование и сравнительный анализ систем гибридной выработки электроэнергии с хранением на основе водорода и сжатого воздуха // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 7–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31301>



V.A. Paseka , N.V. Korovkin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ paseka.va@gmail.com

## MODELING AND COMPARATIVE ANALYSIS OF HYBRID ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEMS USING HYDROGEN AND COMPRESSED AIR ENERGY STORAGES

*Abstract.* Progress in the rational use of energy implies abandoning fossil fuels, and the transition to renewable energy sources (RES) is inevitable in the current scenario of global warming. Efficient utilization of RES in the energy sector is possible only with the parallel use of energy storage systems. Hydrogen as a promising energy carrier opens up vast opportunities for creating efficient and reliable energy storage systems capable of enhancing the stability and economic viability of alternative energy. This article focuses on modeling a hybrid hydrogen-based energy storage system. It describes the model blocks of an electrolyzer, a storage tank and a fuel cell (FC). An analysis of the FC operation under variable demand and excess power conditions is provided, along with the results of simulation modeling in MATLAB/Simulink. The proposed model enables effective management of the balance between energy generation and consumption amid RES instability and ensures reliable power supply during generation shortages by converting hydrogen back into electricity. The efficiency of using hydrogen-based and compressed air-based energy storage has been compared.

**Keywords:** renewable energy sources, electric energy storage systems, hydrogen storage, hybrid energy system, mathematical modeling, fuel cell, electrolyzer.

*Citation:*

Paseka V.A., Korovkin N.V., Modeling and comparative analysis of hybrid electric power generation using hydrogen and compressed air energy storages, Global Energy, 31 (03) (2025) 7–21, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31301>

**Введение.** Рост населения и быстрая урбанизация приводят к увеличению спроса на энергию, для удовлетворения которого системы генерации, функционирующие на основе ископаемого топлива, выбрасывают в окружающую среду парниковые газы, ускоряя глобальное потепление [1]. Поэтому разработки альтернативных методов получения энергии с помощью экологически чистых технологий весьма актуальны. Также с ростом цен на традиционные энергоресурсы актуальной становится независимость промышленных отраслей и стран в целом в энергетическом секторе. Это определяет рост интереса к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), на долю которых, по данным Международного энергетического агентства, к 2028 г. будет приходиться от 42% мировой генерации [2].

ВИЭ способны удовлетворить растущий спрос на энергию, однако ее хранение представляет собой проблему из-за колеблющихся спроса и предложения. В силу своей нестабильности ВИЭ не могут эффективно работать без надежных систем накопления, которые позволяют сглаживать перепады генерации и обеспечивать стабильность энергоснабжения [3, 4].

Сегодня в разработке находится несколько альтернативных способов хранения энергии, среди которых водород рассматривается как один из наиболее перспективных [5]. Системы хранения энергии на основе водорода тестируются и пока не вышли на промышленный уровень, и исследования, связанные с их моделированием и повышением эффективности, являются актуальными [6, 7].



В работах [8–10] предложены подходы к созданию автономных энергосистем с водородными накопителями, позволяющими эффективно сглаживать пиковые нагрузки и повышать устойчивость энергоснабжения, а исследования [11–13] посвящены моделированию энергосистем с водородными накопителями с использованием современных инструментов симуляции, что позволяет оптимизировать их параметры для различных условий эксплуатации (режимы генерации/потребления).

Несмотря на активный интерес ученых к системам хранения энергии на основе водорода, ряд вопросов исследован недостаточно. В частности, требует дальнейшей разработки многоуровневый метод управления мультиэнергетической комплементарной системой ветер-солнце-аккумулятор, который должен обеспечивать как стабильность энергоснабжения, так и эффективное использование генерирующих мощностей. Отдельного внимания заслуживает задача разработки математической модели системы, которая включает электролизер, топливный элемент (ТЭ), необходимые резервуары для водорода, кислорода и воды.

В данном исследования рассмотрены следующие задачи:

1. Разработка математических моделей ключевых компонентов системы: электролизера, бака-накопителя водорода и ТЭ.
2. Анализ поведения гибридной системы хранения на основе водорода при колебаниях спроса на электроэнергию и избыточной мощности в сети.
3. Сравнение водородного накопителя с системой хранения энергии на основе сжатого воздуха по ключевым характеристикам, включая экономическую эффективность, экологичность и масштабируемость.

Целью статьи являются разработка и анализ математической модели гибридной системы хранения энергии на основе водорода, интегрированной с ВИЭ, для сравнения с альтернативными технологиями хранения, такими как системы хранения энергии на основе сжатого воздуха.

### Описание модели

Рассмотрим комплементарную систему гибридной солнечно-водородной энергии, в которой объединены солнечная генерация, электролитическое производство водорода из воды и система ТЭ (рис. 1). Водород, получаемый электролизом воды, используется в качестве энергоносителя. Энергия для получения водорода генерируется ВИЭ. Водород хранится в сосудах высокого давления, в жидком виде или в виде гидридов определенных материалов. На сегодня самым изученным и доступным является гидрид магния ( $MgH_2$ ) [14].



Рис. 1. Мультиэнергетическая комплементарная система хранения энергии на основе водорода

Fig. 1. Multi-energy complementary hydrogen-based energy storage system

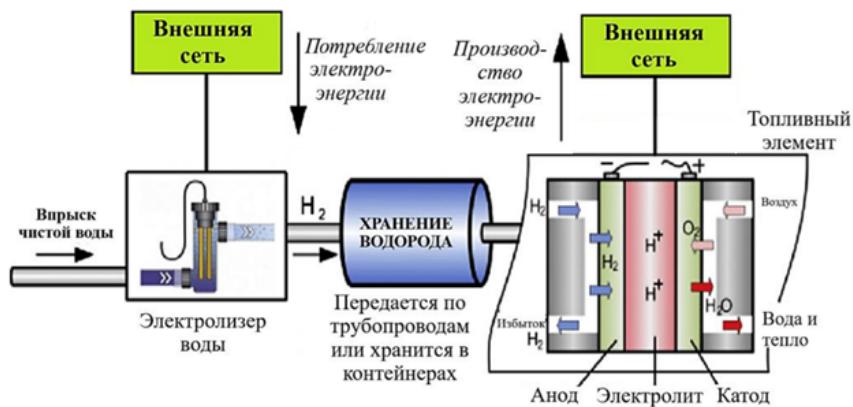


Рис. 2. Топология системы хранения водорода

Fig. 2. Topology of the hydrogen storage system

ТЭ являются незаменимой частью системы хранения водорода, выполняя функцию прямого преобразования химической энергии водорода в электричество без процесса горения [15]. ТЭ предлагают альтернативу сжиганию топлива, обладают высокими энергетическими характеристиками и уже нашли свое применение в крупномасштабных пилотных проектах систем хранения электрической энергии. Структурная схема работы системы хранения на основе водорода представлена на рис. 2.

#### *Моделирование солнечных фотоэлектрических систем*

Солнечный фотоэлектрический преобразователь конвертирует энергию солнца в электричество постоянного тока. Мощность, вырабатываемая солнечной батареей, определяется по формуле (1); КПД и температура ячейки солнечного фотоэлектрического элемента определяются уравнениями (2) и (3) соответственно:

$$P_{vt}(t) = G(t) \cdot A_{pv} \cdot \eta_{pv}(t); \quad (1)$$

$$\eta_{pv}(t) = \eta_{pv,ref} \left( 1 - \alpha (T_c(t) - T_{ref}) \right); \quad (2)$$

$$T_c = T_{amb}(t) + G(t) \left[ \frac{NOCT - 298.15}{800} \right], \quad (3)$$

где  $P_{vt}(t)$  – электрическая мощность, вырабатываемая солнечной батареей (Вт);  $G(t)$  – солнечное излучение ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $A_{pv}$  – площадь солнечной панели ( $\text{м}^2$ );  $\eta_{pv}(t)$  – часовой КПД солнечной панели, который изменяется в зависимости от температуры ячейки (%);  $\eta_{pv,ref}$  – КПД солнечной панели в условиях испытаний (%);  $\alpha$  – температурный коэффициент при максимальной мощности ( $1/\text{K}$ );  $T_c(t)$  – часовая температура ячейки (К);  $T_{ref}$  – температура в условиях испытания (К);  $T_{amb}(t)$  – температура окружающей среды (К);  $NOCT$  – номинальная рабочая температура ячейки (К).

#### *Хранение водорода*

Существует несколько технологий хранения водорода (табл. 1). Наиболее популярными являются технологии хранения сжатого газообразного и сжиженного водорода [16]. Водород, обладающий высокой энергоемкостью (120 МДж/кг) и низкой плотностью (0,0899 кг/м<sup>3</sup> при нормальных условиях), может быть сжат до 700 бар, что значительно повышает его удельную

Таблица 1

Table 1

## Сравнение различных технологий хранения водорода

## Comparison of different hydrogen storage technologies

Технология	Энергоэффективность	Плюсы	Минусы	Применение
Сжатый газообразный водород	85–90%	Быстрая зарядка/разрядка; Относительно низкие капитальные затраты	Низкая плотность энергии; Высокие энергозатраты на сжатие (до 10–15% энергии); Риск утечек при длительном хранении	Подходит для кратковременного хранения (часы/дни)
Сжиженный водород	60–70%	Высокая плотность энергии; Возможность транспортировки на большие расстояния	Огромные энергозатраты на сжжение (до 30% энергии); Потери на испарение (0,1–1% в сутки); Дорогая криогенная инфраструктура	Экономически оправдан только для специфических применений (например, для ВИЭ)
Металл-гидриды	70–80%		Низкая гравиметрическая плотность (не подходит для больших мощностей); Требуется нагрев для выделения водорода (дополнительные энергозатраты); Медленная кинетика зарядки/разрядки	Подходит для небольших стационарных систем, но не для масштабной энергетики
Жидкие органические носители	60–70%		Безопасность (низкое давление); Компактность (высокая объемная плотность)	Требуется энергия для легирования (до 30% энергии водорода); Побочные продукты (детрадианосителя); Низкая эффективность
Подземное хранение (соляные каверны, водоносные пластины)	90–95%		Огромные объемы (аналогично хранению природного газа); Низкая стоимость (\$ 1–3 за 1 кг); Минимальные потери	Ограниченнная география (требуются подходящие геологические формации); Риск взаимодействия водорода с породой/микроорганизмами
				Подходит для крупномасштабного хранения (ГВт·ч – ТВт·ч)



энергоемкость на единицу объема и позволяет компактно хранить большие количества водорода в баллонах и резервуарах, уменьшая затраты на транспортировку и инфраструктуру [17]. Технология твердофазного хранения находится в процессе разработки, и в ближайшие десятилетия ожидается ее широкое применение.

В проводимом исследовании используется технология хранения сжатого газообразного водорода с рабочим давлением 30 бар. Предлагается использовать три резервуара: для водорода, кислорода и воды. Для электролизера необходимы вода и электричество для производства кислорода и водорода, которые хранятся в первых двух резервуарах. Для получения электрической энергии ТЭ потребляет из этих резервуаров водород и кислород. Вода, полученная в результате работы ТЭ, хранится в резервуаре и затем поступает в электролизер. Цикл продолжается в зависимости от цикла зарядки и разрядки системы. Мгновенное давление в баке описывается уравнением (4), а формула для коэффициента сжимаемости – уравнением (5):

$$P_t - P_{ti} = \frac{Z_c N_{H_1} R T_t}{M_{H_2} V_t}; \quad (4)$$

$$Z_c = \frac{P_t V_m}{R T_t}, \quad (5)$$

где  $P_t$  – давление в водородном баке (Па);  $P_{ti}$  – начальное давление в водородном баке (Па);  $Z_c$  – коэффициент сжимаемости;  $N_{H_1}$  – количество водорода, подаваемого в резервуар (моль/с);  $R$  – универсальная газовая постоянная (Дж моль/К);  $M_{H_2}$  – молярная масса водорода (кг/моль);  $V_t$  – объем резервуара ( $\text{м}^3$ );  $T_t$  – температура резервуара (К);  $V_m$  – молярный объем водорода ( $\text{м}^3/\text{моль}$ ).

Расход и производство каждой жидкости определяются уравнениями (6)–(8):

$$Q_{H_2}(t + \Delta t) = Q_{H_2}(t) + [F_{H_2}^p(t) + F_{H_2}^c(t) - L_{H_2}] \Delta t; \quad (6)$$

$$Q_{O_2}(t + \Delta t) = Q_{O_2}(t) + [F_{O_2}^p(t) + F_{O_2}^c(t) - L_{O_2}] \Delta t; \quad (7)$$

$$Q_{H_2O}(t + \Delta t) = Q_{H_2O}(t) + [F_{H_2O}^p(t) + F_{H_2O}^c(t)] \Delta t, \quad (8)$$

где  $Q_{H_2}$ ,  $Q_{O_2}$ ,  $Q_{H_2O}$  – количества водорода, кислорода, воды в резервуаре (кг) соответственно;  $F_{O_2}^p$  – произведененный кислород (кг/с);  $F_{O_2}^c$  – потребление кислорода (кг/с);  $L_{O_2}$  – потери кислорода (кг/с);  $F_{H_2}^p$  – вырабатываемый водород (кг/с);  $F_{H_2}^c$  – потребление водорода (кг/с);  $L_{H_2}$  – потери водорода (кг/с);  $F_{H_2O}^p$  – произведенная вода (кг/с);  $F_{H_2O}^c(t)$  – потребление воды (кг/с).

#### *Модель электролизера*

Согласно закону Тафеля, напряжение на ячейке электролизера связано с плотностью тока  $j$  соотношением [18]:

$$U_{яч} = E_p + a + b \log\left(\frac{I}{I_0}\right) + cI, \quad (9)$$

где  $E_p$  – минимальное напряжение, необходимое для протекания электролиза в идеальных условиях (В);  $I$  – сила тока электролизера (А);  $I_0$  – сила тока, при которой перенапряжение равно нулю (А).



Параметры  $a$ ,  $b$  и  $c$  определяются характеристиками (геометрия, мембрана, поток, материалы, температура и давление) ячейки электролизера.

Зависимость напряжения от тока с  $s$  и  $p$  – количеством ячеек при последовательном и параллельном соединении – на основе закона Тафеля определяется следующим уравнением [19]:

$$U_s = s \cdot \left( E_p + \left( a + b \log \left( \frac{I_e}{p \cdot I_0} \right) + c \frac{I_e}{p} \right) \right), \quad (10)$$

где  $U_s$  – общее напряжение электролизера,  $I_e$  – общий ток электролизера.

В системах хранения энергии на основе водорода применяются три основных типа электролизеров:

- с протонообменной мембранный (proton-exchange membrane, PEM) – используют твердые полимерные электролиты. Обладают быстрым откликом (минуты), высокой плотностью тока и высоким показателем чистого выходного водорода (>99,95%). Подходят для работы с нестабильными ВИЭ [20];
- щелочные – используют жидкие электролиты. Обладают достаточно низкой стоимостью материалов, медленно реагируют на изменения внешней нагрузки, требуют дополнительной очистки водорода [21];
- твердооксидные – работают при высоких температурах (700–800°), работают с высоким КПД (~90%), но при этом обладают длительным запуском (часы) и имеют проблемы с долговременной стабильностью [22].

В данной статье рассматривается PEM-электролизер как наиболее подходящий для гибридных систем с ВИЭ благодаря быстрому отклику.

Полученная модель приведена для исследования системы гибридного хранения энергии на основе водорода с целью анализа ее эффективности в условиях переменного спроса и избыточной мощности. Модель реализована в среде MATLAB/Simulink с учетом работы ключевых компонентов системы, в том числе электролизера, бака-накопителя водорода и ТЭ.

## Результаты

Исследуемая система – это гибридный электрохимический водородный накопитель на основе PEM-технологий с хранением скатого газообразного водорода, оптимизированный для интеграции с солнечной электростанцией. Основные параметры водородного накопителя приведены в табл. 2. Моделирование водородного накопителя и DC/DC преобразователя с динамической системой управления было выполнено в MATLAB/Simulink и представлено на рис. 3.

Для тестирования предложенной модели предлагается автономная сеть постоянного тока, включающая солнечную электростанцию (СЭС) и активную нагрузку с переменным потреблением. Данная конфигурация позволяет исследовать работу системы в условиях реальной эксплуатации, когда мощность генерации СЭС зависит от уровня солнечной инсоляции, а нагрузка меняется в течение дня.

Входным сигналом модели водородного накопителя является активная мощность в сети (избыток/дефицит) (рис. 4). Для анализа работы системы предусмотрен характерный режим работы внешней сети в промежутке времени от 10:00 до 13:00. В начальный момент времени мощность нагрузки превышает генерируемую мощность СЭС в связи низким уровнем инсоляции в начале дня (10:00–10:20), далее с повышением инсоляции преобладает генерируемая мощность СЭС (10:20–12:20), после чего происходит рост нагрузки, способствующий дефициту мощности в сети. Предполагается, что в начальный момент времени запасенная энергия водородного накопителя равна  $W_{H2} = 4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ .

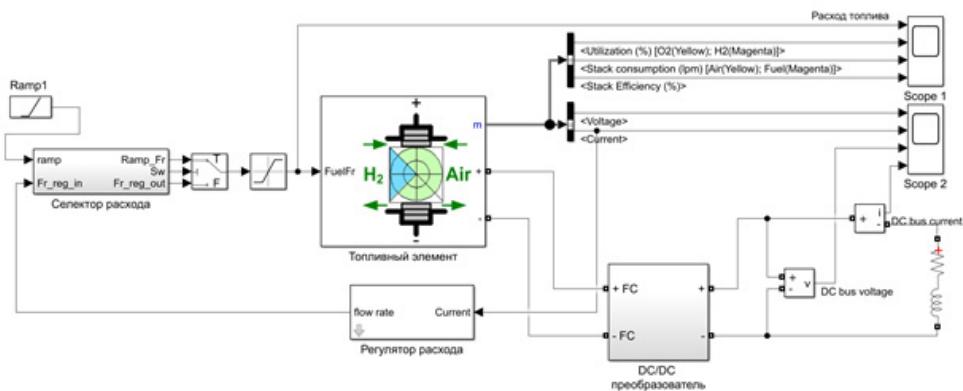


Рис. 3. Модель системы топливных элементов в MATLAB/SIMULINK

Fig. 3. Fuel Cell System Model in MATLAB/SIMULINK

Таблица 2

## Основные параметры водородного накопителя

Table 2

## The main parameters of the hydrogen storage

Параметры	Значение
<b>Тип накопителя</b>	Электрохимический (электролизер + ТЭ)
Максимальная емкость	15 кВт·ч
Рабочее давление	30 бар
<b>Тип электролизера</b>	PEM-электролизер
Максимальная рабочая мощность	8 кВт
Минимальная рабочая мощность	0,5 кВт
КПД (при номинальной нагрузке)	68%
Время выхода на режим	4,5 мин
<b>Тип ТЭ</b>	PEMFC
Максимальная рабочая мощность	6 кВт
Минимальная рабочая мощность	0,5 кВт
КПД (при номинальной нагрузке)	50%
Время отклика	2,8 мин

Результаты, представленные на рис. 4, отображают работу водородного накопителя в режиме электролизера или ТЭ в зависимости от мощности в сети. В период дефицита мощности (10:00–10:20 и после 12:20) ТЭ активируется, преобразуя запасенный водород в электричество для компенсации дефицита. Однако при низком дефиците мощности ТЭ не включается по следующим причинам:

- *Порог срабатывания.* ТЭ имеет минимальную рабочую мощность (0,5 кВт, см. табл. 2). Если дефицит меньше этого значения, система игнорирует его из-за низкого КПД и инерционности процесса.
- *Длительное время отклика* (2,8 мин, см. табл. 2). ТЭ не может мгновенно реагировать на кратковременные колебания, поэтому система имеет небольшой дисбаланс по мощности.

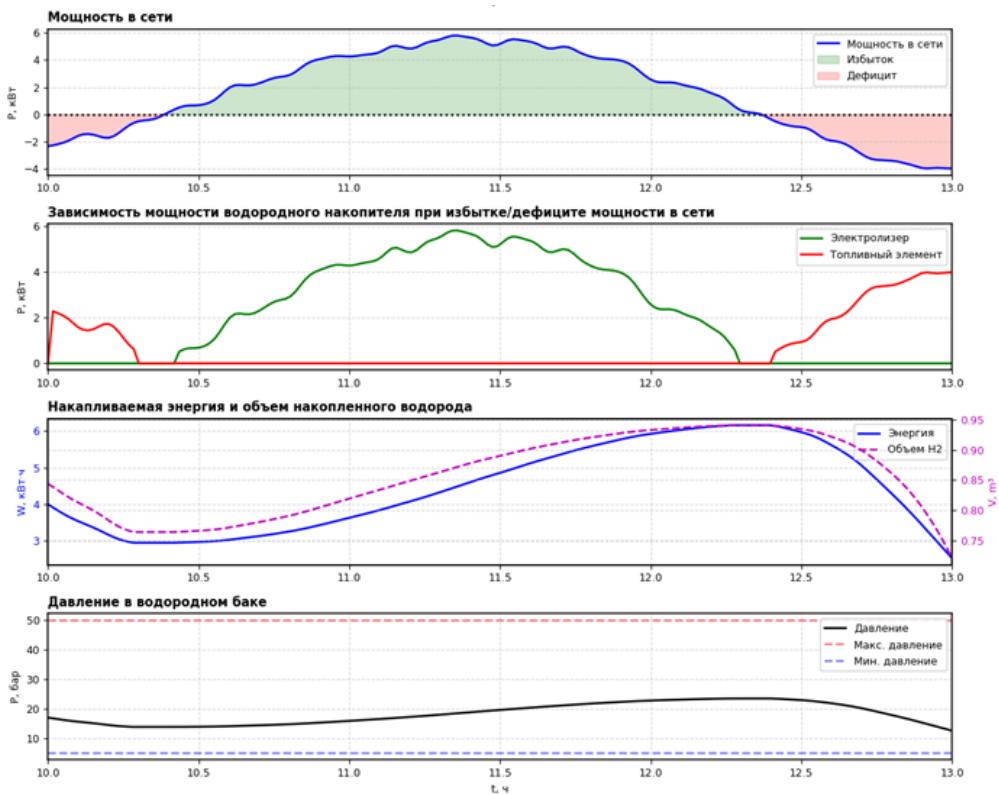


Рис. 4. Работа водородного накопителя

Fig. 4. Operation of the hydrogen storage

В период избытка мощности (10:20–12:20) включается электролизер, потребляя избыточную энергию для производства водорода. Однако при низком избытке мощности электролизер не запускается по следующим причинам:

- *Минимальная рабочая мощность (0,5 кВт, см. табл. 2).* Если избыток меньше этого значения, то экономически нецелесообразно его использовать (КПД электролиза падает при малых нагрузках).
- *Длительное время отклика (4,5 мин, см. табл. 2).* Запуск электролизера требует времени достаточно продолжительного времени.

Изменение накапливаемого водорода происходит не прямо пропорционально накапливаемой энергии в связи с непостоянством КПД РЕМ-электролизера, который имеет КПД 68% (при номинальной нагрузке), но его эффективность снижается при неполной загрузке. При малой мощности (близкой к минимальной 0,5 кВт) увеличиваются потери на нагрев, перенапряжение электродов и паразитные токи, что приводит к снижению доли энергии, идущей на производство водорода.

Проведенное моделирование гибридной системы хранения энергии на основе водорода продемонстрировало ее работоспособность и эффективность в условиях переменной генерации СЭС и изменяющейся нагрузки в сети. Система успешно выполняет свои функции: в периоды избыточной генерации электролизер преобразует избыточную энергию в водород с КПД до 68%, а при дефиците мощности ТЭ обеспечивает энергоснабжение с КПД 50%. Однако существуют технологические ограничения, включая минимальные пороги мощности (0,5 кВт) для работы водородного накопителя, заметную инерционность процессов (2,8–4,5 мин) и снижение эффективности при работе на неполной мощности.

Таблица 3

**Сравнение характеристик водородного накопителя и CAES**

Table 3

**Comparison of the characteristics of a hydrogen storage device and a CAES**

Характеристика	Водородный накопитель	CAES
<b>Принцип работы</b>	Электролиз воды → хранение H <sub>2</sub> → ТЭ	Сжатие воздуха → хранение → расширение через турбину
<b>КПД системы</b>	40–60%	50–70% (до 75% для адиабатических систем)
<b>Капитальные затраты</b>	1000–3000 \$/кВт	600–1500 \$/кВт
<b>Срок окупаемости</b>	10–20 лет	5–10 лет
<b>Объем газа на 1 кВт ч</b>	0,025 м <sup>3</sup>	0,3 м <sup>3</sup>
<b>Время хранения</b>	Долгосрочное (сезонное)	Среднесрочное (часы/дни)
<b>Масштабируемость</b>	Подходит для автономных систем и транспорта	Требует крупных геологических хранилищ
<b>Экологичность</b>	Нулевые выбросы (при использовании ВИЭ)	Возможны выбросы CO <sub>2</sub> (в традиционных системах)
<b>Время отклика</b>	Несколько минут	Несколько минут
<b>Типичная мощность</b>	От кВт до МВт	От десятков МВт до ГВт
<b>Требования к инфраструктуре</b>	Специальные резервуары для H <sub>2</sub> , ТЭ	Подземные хранилища (соляные каверны и др.)

**Сравнение водородного накопителя и накопителя со сжатым воздухом**

К наиболее распространенным системам хранения энергия относятся литий-ионные аккумуляторы, проточные батареи, гидроаккумулирующие станции (ГАЭС) и системы на основе сжатого воздуха (Compressed-air energy storage, CAES) [23]. Однако технологически близким аналогом водородных накопителей по ключевым критериям являются CAES: обе системы относятся к механико-химическим методам хранения большой мощности и ориентированы на долгосрочную аккумуляцию энергии, используют газообразную среду (водород/воздух) для регенерации в электричество, что позволяет корректно сравнивать их КПД, плотность энергии и параметры хранения, обусловленные схожими инфраструктурными требованиями (компрессоры, хранилища высокого давления).

Водородные накопители и CAES используют разные принципы аккумулирования энергии. В отличие от водородных систем, в CAES сжимается воздух для аккумулирования в хранилищах с последующим преобразованием в электрическую энергию за счет расширения через турбину. Эта технология лучше подходит для среднесрочного хранения и балансировки нагрузки в крупных энергосистемах [24].

При выборе системы хранения энергии для интеграции с ВИЭ ключевым фактором является экономическая эффективность. Водородные накопители и CAES существенно различаются по капитальным затратам (Capital expenditure, CAPEX), сроку окупаемости и стоимости хранения энергии. CAES дешевле в CAPEX (на 30–50%), особенно при использовании подземных хранилищ. Водородные системы дороже из-за стоимости электролизеров и ТЭ [6, 25]. Соответственно, срок окупаемости водородных систем также выше, чем у CAES.

По сравнению с системами CAES водород обладает значительно меньшей плотностью, чем воздух, что обуславливает необходимость использования больших объемов для хранения



сжатого воздуха. Для аккумулирования энергии, равной  $W = 1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , требуемый объем газа составляет  $V_{\text{возд}} \approx 0,3 \text{ м}^3$  в случае CAES [26], тогда как для водородных систем достаточно  $V_{H_2} \approx 0,025 \text{ м}^3$  в соответствии с результатами, представленными на рис. 4.

Основные характеристики водородных накопителей и CAES наглядно представлены в табл. 3.

Сравнение систем хранения водорода и CAES (табл. 3) выявило существенные различия в их характеристиках и области применения. Водородные системы обладают преимуществами с точки зрения высокой энергоемкости и экологичности (нулевые выбросы при использовании ВИЭ) и гибкости применения (от небольших автономных систем до транспортировки), но они уступают CAES с точки зрения экономической эффективности (капитальные затраты выше на 30–50%) и КПД (40–60% против 50–70%). С другой стороны, CAES более выгодны для крупномасштабного среднесрочного хранения энергии в энергосистемах, хотя требуют специальной геологической инфраструктуры.

### Заключение

В статье проведено исследование гибридной системы хранения энергии на основе водорода, интегрированной с СЭС. Разработаны математические модели ключевых компонентов системы, включая электролизер, бак-накопитель водорода и ТЭ, что позволило проанализировать работу водородного накопителя в условиях дефицита и профицита мощности в сети. Результаты имитационного моделирования в MATLAB/Simulink подтвердили работоспособность и адекватность предложенной системы в управлении балансом между генерацией и потреблением энергии.

Сравнение системы хранения водорода с системой накопления энергии на сжатом воздухе выявило ключевые преимущества и недостатки каждой технологии. Водородные системы отличаются высокой энергоемкостью, экологичностью, гибкостью применения и подходят для длительного хранения, но они уступают CAES с точки зрения экономичности и результативности. С другой стороны, CAES более выгодны для крупномасштабного среднесрочного хранения, но требуют специальной инфраструктуры и могут привести к выбросам  $\text{CO}_2$ .

Проведенное исследование подтвердило перспективность водородных накопителей для интеграции с ВИЭ, особенно в автономных и распределенных энергосистемах. Дальнейшие работы могут быть направлены на оптимизацию параметров системы, снижение капитальных затрат и улучшение динамических характеристик компонентов.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sahoo B., Behera D.K., Rahut D. Decarbonization: examining the role of environmental innovation versus renewable energy use, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (2022) 48704–48719. DOI: 10.1007/s11356-022-18686-1
- [2] International Energy Agency, *Renewables 2023*, (2024). Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (дата обращения: 30.06.2025)
- [3] Lv Y., Qin R., Sun H., Guo Z., Fang F., Niu Y. Research on energy storage allocation strategy considering smoothing the fluctuation of renewable energy, *Frontiers in Energy Research*, 11 (2023). DOI: 10.3389/fenrg.2023.1094970
- [4] Jiang T., Shen D., Zhang Z., Liu H., Zhao G., Wang Y., Tan S. Luo R., Chen W. Battery technologies for grid-scale energy storage, *Nature Reviews Clean Technology*, 1 (2025) 474–492. DOI: 10.1038/s44359-025-00067-9
- [5] Ersoy H., Baumann M., Barelli L., Ottaviano A., Trombetti L., Weil M., Passerini S. Hybrid energy storage and hydrogen supply based on aluminum – a multiservice case for electric mobility and energy storage services, *Advanced Materials Technologies*, 7 (8) (2022) 2101400. DOI: 10.1002/admt.202101400

- [6] Мартянов А.С., Терехин А.А., Исмагилов Д.Р., Ян Ю., Ковалев А.А., Рявкин Г.Н., Мирошниченко А.А., Кичатов В.В. Теоретическое и экспериментальное исследование ветроэнергетической установки с водородным накопителем // Альтернативная энергетика и экология. 2021. № 25–27. С. 72–89. DOI: 10.15518/isjaee.2021.09.072-089
- [7] Lebrouhi B.E., Djoupo J.J., Lamrani B., Benabdellaziz K., Kousksou T. Global hydrogen development – A technological and geopolitical overview, International Journal of Hydrogen Energy, 47 (11) (2022) 7016–7048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.076
- [8] Alzahrani A., Ramu S.K., Devarajan G., Vairavasundaram I., Vairavasundaram S. A Review on hydrogen-based hybrid microgrid system: Topologies for hydrogen energy storage, integration, and energy management with solar and wind energy, Energies, 15 (21) (2022) 7979. DOI: 10.3390/en15217979
- [9] Попов С.П., Шакиров В.А., Колосницаин А.В., Максакова Д.В., Балдынов О.А. Технико-экономическая модель автономного комплекса по производству «зеленого» водорода и ее апробация на примере Монголии и Японии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 11. С. 124–139. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3773
- [10] Карасевич В., Васильев Ю., Негримовский В. Перспективы автономного энергоснабжения изолированных объектов и поселений в арктических регионах РФ с применением водородных технологий // Энергетическая политика. 2023. Т. 188, № 9. С. 62–69. DOI: 10.46920/2409-5516\_2023\_9188\_62
- [11] Abdollahipour A., Sayyaadi H. Optimal design of a hybrid power generation system based on integrating PEM fuel cell and PEM electrolyzer as a moderator for micro-renewable energy systems, Energy, 260 (2022) 124944. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124944
- [12] Mohammed A., Ghaithan A.M., Al-Hanbali A., Attia A.M. A multi-objective optimization model based on mixed integer linear programming for sizing a hybrid PV-hydrogen storage system, International Journal of Hydrogen Energy, 48 (26) (2023) 9748–9761. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.060
- [13] Pignataro V., Liponi A., Bargiacchi E., Ferrari L. Dynamic model of a power-to-gas system: Role of hydrogen storage and management strategies, Renewable Energy, 230 (2024) 120789. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120789
- [14] Xie X., Chen M., Hu M., Wang B., Yu R., Liu T. Recent advances in magnesium-based hydrogen storage materials with multiple catalysts, International Journal of Hydrogen Energy, 44 (21) (2019) 10694–10712. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.237
- [15] Иса X.А., Муровский С.П., Шахова Н.В., Гусева Е.В., Кувшинов В.В. Комбинированная энергетическая система с использованием фотоэлектрических преобразователей и топливных элементов // Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10, № 3. С. 56–62.
- [16] Naquash A., Agarwal N., Lee M. A review on liquid hydrogen storage: Current status, challenges and future directions, Sustainability, 16 (2024) 8270. DOI: 10.3390/su16188270
- [17] Pillai K., Sundaram S. Optimization and feasibility analysis of hybrid distributed generator based system with a comparison of battery and hydrogen energy storage for residential electrification, Energy Storage, 6 (8) (2024) e70075. DOI: 10.1002/est.2.70075
- [18] Sarwar F.A., Hernando-Gil I., Vechiu I. Review of energy management systems and optimization methods for hydrogen-based hybrid building microgrids, Energy Conversion and Economics, 5 (4) (2024) 259–279. DOI: 10.1049/enc2.12126
- [19] Sifakis N., Vichos E., Smaragdakis A., Zoulias E., Tsoutsos T. Introducing the cold-ironing technique and a hydrogen-based hybrid renewable energy system into ports, International Journal of Energy Research, 46 (2022) 20303–20323. DOI: 10.1002/er.8059
- [20] Falcao D.S., Pinto A.M.F.R. A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners, Journal of Cleaner Production, 261 (2020) 121184. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121184
- [21] López-Fernández E., Sacedón C.G., Gil-Rostra J., Yubero F., González-Elipe A.R., De Lucas-Consegra A. Recent advances in alkaline exchange membrane water electrolysis and electrode manufacturing, Molecules, 26 (21) (2021) 6326. DOI: 10.3390/molecules26216326



- [22] Hauch A., Küngas R., Blennow P., Hansen A.B., Hansen J.B., Mathiesen B.V., Mogensen M.B. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis, *Science*, 370 (6513) (2020) 6118. DOI: 10.1126/science.aba6118
- [23] Kebede A.A., Kalogiannis T., Van Mierlo J., Berecibar M. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 159 (2022) 112213. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112213
- [24] Bazdar E., Sameti M., Nasiri F., Haghigat F. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167 (2022) 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701
- [25] International Renewable Energy Agency (IRENA). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolyzers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
- [26] Budt M., Wolf D., Span R., Yan J. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, *Applied Energy*, 170 (2016) 250–268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПАСЕКА Василий Анатольевич** – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.  
E-mail: paseka.va@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1875-4253>

**КОРОВКИН Николай Владимирович** – зав. кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

## REFERENCES

- [1] B. Sahoo, D.K. Behera, D. Rahut, Decarbonization: examining the role of environmental innovation versus renewable energy use, *Environmental Science and Pollution Research*, 29 (2022) 48704–48719. DOI: 10.1007/s11356-022-18686-1
- [2] International Energy Agency, Renewables 2023, (2024). Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023> (дата обращения: 30.06.2025)
- [3] Y. Lv, R. Qin, H. Sun, Z. Guo, F. Fang, Y. Niu, Research on energy storage allocation strategy considering smoothing the fluctuation of renewable energy, *Frontiers in Energy Research*, 11 (2023). DOI: 10.3389/fenrg.2023.1094970
- [4] T. Jiang, D. Shen, Z. Zhang, H. Liu, G. Zhao, Y. Wang, S. Tan, R. Luo, W. Chen, Battery technologies for grid-scale energy storage, *Nature Reviews Clean Technology*, 1 (2025) 474–492. DOI: 10.1038/s44359-025-00067-9
- [5] H. Ersoy, M. Baumann, L. Barelli, A. Ottaviano, L. Trombetti, M. Weil, S. Passerini, Hybrid energy storage and hydrogen supply based on aluminum – a multiservice case for electric mobility and energy storage services, *Advanced Materials Technologies*, 7 (8) (2022) 2101400. DOI: 10.1002/admt.202101400
- [6] A.S. Martyanov, A.A. Terekhin, D. Ismagilov, Yu. Yang, A.A. Kovalyov, G.N. Ryavkin, A.A. Miroshnichenko, V.V. Kichatov, Theoretical and experimental research on wind power hydrogen storage energy system. *Alternative Energy and Ecology (ISJAAEE)*, 25–27 (2021) 72–89. DOI: 10.15518/isjaaee.2021.09.072-089

- [7] **B.E. Lebrouhi, J.J. Djoupo, B. Lamrani, K. Benabdellaziz, T. Kousksou**, Global hydrogen development – A technological and geopolitical overview, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47 (11) (2022) 7016–7048. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.076
- [8] **A. Alzahrani, S.K. Ramu, G. Devarajan, I. Vairavasundaram, S. Vairavasundaram**, A Review on hydrogen-based hybrid microgrid system: Topologies for hydrogen energy storage, integration, and energy management with solar and wind energy, *Energies*, 15 (21) (2022) 7979. DOI: 10.3390/en15217979
- [9] **S.P. Popov, V.A. Shakirov, A.V. Kolosnitsyn, D.V. Maksakova, O.A. Baldynov**, Technical and economic model of an autonomous complex for production of «green» hydrogen and its testing on the example of Mongolia and Japan, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333 (11) (2022) 124–139. DOI: 10.18799/24131830/2022/11/3773
- [10] **V. Karasevich, Yu. Vasiliev, V. Negrimovsky**, Prospects of autonomic energy supply of isolated areas in Russian Arctic regions using hydrogen technologies, *Energeticheskaya politika [Energy Policy]*, 188 (9) (2023) 62–69. DOI: 10.46920/2409-5516\_2023\_9188\_62
- [11] **A. Abdollahipour, H. Sayyaadi**, Optimal design of a hybrid power generation system based on integrating PEM fuel cell and PEM electrolyzer as a moderator for micro-renewable energy systems, *Energy*, 260 (2022) 124944. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124944
- [12] **A. Mohammed, A.M. Ghaithan, A. Al-Hanbali, A.M. Attia**, A multi-objective optimization model based on mixed integer linear programming for sizing a hybrid PV-hydrogen storage system, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (26) (2023) 9748–9761. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.060
- [13] **V. Pignataro, A. Liponi, E. Bargiacchi, L. Ferrari**, Dynamic model of a power-to-gas system: Role of hydrogen storage and management strategies, *Renewable Energy*, 230 (2024) 120789. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120789
- [14] **X. Xie, M. Chen, M. Hu, B. Wang, R. Yu, T. Liu**, Recent advances in magnesium-based hydrogen storage materials with multiple catalysts, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (21) (2019) 10694–10712. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.237
- [15] **H.A. Issa, S.P. Murovskiy, N.V. Shakhova, E.V. Guseva, V.V. Kuvshinov**, Combined energy system using photoelectric converters and fuel cells, *Power plants and technologies*, 10 (3) (2024) 56–62.
- [16] **A. Naquash, N. Agarwal, M. Lee**, A review on liquid hydrogen storage: Current status, challenges and future directions, *Sustainability*, 16 (2024) 8270. DOI: 10.3390/su16188270
- [17] **K. Pillai, S. Sundaram**, Optimization and feasibility analysis of hybrid distributed generator based system with a comparison of battery and hydrogen energy storage for residential electrification, *Energy Storage*, 6 (8) (2024) e70075. DOI: 10.1002/est.2.70075
- [18] **F.A. Sarwar, I. Hernando-Gil, I. Vechiu**, Review of energy management systems and optimization methods for hydrogen-based hybrid building microgrids, *Energy Conversion and Economics*, 5 (4) (2024) 259–279. DOI: 10.1049/enc2.12126
- [19] **N. Sifakis, E. Vichos, A. Smaragdakis, E. Zoulias, T. Tsoutsos**, Introducing the cold-ironing technique and a hydrogen-based hybrid renewable energy system into ports, *International Journal of Energy Research*, 46 (2022) 20303–20323. DOI: 10.1002/er.8059
- [20] **D.S. Falcao, A.M.F.R. Pinto**, A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners, *Journal of Cleaner Production*, 261 (2020) 121184. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121184
- [21] **E. López-Fernández, C.G. Sacedón, J. Gil-Rostra, F. Yubero, A.R. González-Elipe, A. De Lucas-Con-suegra**, Recent advances in alkaline exchange membrane water electrolysis and electrode manufacturing, *Molecules*, 26 (21) (2021) 6326. DOI: 10.3390/molecules26216326
- [22] **A. Hauch, R. Küngas, P. Blennow, A.B. Hansen, J.B. Hansen, B.V. Mathiesen, M.B. Mogensen**, Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis, *Science*, 370 (6513) (2020) 6118. DOI: 10.1126/science.aba6118
- [23] **A.A. Kebede, T. Kalogiannis, J. Van Mierlo, J. Berecibar**, A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 159 (2022) 112213. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112213

- [24] **E. Bazdar, M. Sameti, F. Nasiri, F. Haghigat**, Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167 (2022) 112701. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112701
- [25] International Renewable Energy Agency (IRENA). Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
- [26] **M. Budt, D. Wolf, R. Span, J. Yan**, A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, *Applied Energy*, 170 (2016) 250–268. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.108

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Vasiliy A. PASEKA** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: paseka.va@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1875-4253>

**Nikolay V. KOROVKIN** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

**Поступила: 01.07.2025; Одобрена: 25.07.2025; Принята: 29.07.2025.**  
**Submitted: 01.07.2025; Approved: 25.07.2025; Accepted: 29.07.2025.**

Научная статья

УДК 621.313.322-81

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31302>



*Т.Н. Карташова, А.Ю. Прокофьев, А.Г. Филин , Н.В. Гришин*

Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт» (АО «Силовые машины»), Санкт-Петербург, Россия

 [a.g.filin@gmail.com](mailto:a.g.filin@gmail.com)

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ**

**Аннотация.** В статье выполнен обзор актуальных схем охлаждения современных высоко-нагруженных турбогенераторов большой мощности с полным воздушным охлаждением. Обозначены основные сдерживающие факторы, ограничивающие применение различных схем воздушного охлаждения, а также показаны перспективные направления развития схем воздушного охлаждения, способы повышения их эффективности. Сравнению подлежат две основные схемы воздушного охлаждения, применимые для турбогенераторов большой мощности: нагнетательная многоструйная и с независимыми контурами охлаждения ротора и статора. Особое внимание уделяется затратам мощности, расходуемой в этих схемах на охлаждение активных частей генератора. Потери на вентиляцию определяются расходом охлаждающего воздуха и удельным напором на перемещение единичного объема воздуха по контуру охлаждения, повышение эффективности системы охлаждения возможно за счет минимизации двух указанных параметров. Целесообразно при этом контуры охлаждения ротора и статора рассматривать отдельно. В работе показано, что для обоих упомянутых контуров охлаждения более высокую эффективность, т.е. меньшие затраты мощности на вентиляцию, обеспечивает вытяжная схема с независимыми контурами охлаждения ротора и статора. В контуре охлаждения ротора это обеспечивается благодаря применению неподвижного направляющего аппарата, обеспечивающего снижение удельного напора, подводимого к воздуху в напорных элементах ротора. При этом снижаются вентиляционный подогрев воздуха в роторе и расход охлаждающего воздуха, но при грамотном выборе величины начальной закрутки перед ротором в неподвижном направляющем аппарате влияние первого указанного эффекта доминирует над вторым. В контуре охлаждения статора, где лимитирующим горячим элементом являются зубцовая зона и обмотка сердечника, схема с разделением потоков оказывается более эффективной благодаря исключению отработанного горячего воздуха из зазора между ротором и статором из дальнейшего участия в охлаждении активных частей статора. В нагнетательной многоструйной схеме воздух из зазора выпускается через охлаждающие каналы выпускных горячих отсеков сердечника статора, что требует увеличения расхода в контуре охлаждения статора для разбавления горячего потока роторного контура и ведет к росту затрат в данной схеме охлаждения, а также вынуждает проектировщика усложнять данную схему введением дополнительных промежуточных воздухоохладителей и увеличивать габариты активных частей для снижения удельных электрических нагрузок и тепловыделения в них.

**Ключевые слова:** турбогенератор, охлаждение, воздух, эффективность, схема вентиляции, направляющий аппарат, вентилятор.

**Для цитирования:**

Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г., Гришин Н.В. Оценка эффективности систем воздушного охлаждения турбогенераторов // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 22–44. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31302>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31302>

*T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofev, A.G. Filin , N.V. Grishin*

Joint Stock Company “Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomachexport”  
(JSC “Power machines”), St. Petersburg, Russia

a.g.filin@gmail.com

## ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF AIR-COOLED TURBOGENERATORS

*Abstract.* The article provides an overview of current air-cooling schemes for modern high-load high-capacity turbogenerators with full air cooling. It outlines the main limitations that restrict the use of various cooling options, as well as potential areas for improvement and ways to enhance the efficiency of air-cooling systems. Two main cooling schemes applicable to high-capacity turbogenerators are compared: multi-chamber forward-flow cooling scheme and independent cooling circuits for the rotor and stator. Special attention is paid to the power consumption in these circuits for cooling the active parts of the generator. Ventilation losses are determined by the cooling air flow rate and the specific pressure required to move a single volume of air along the cooling circuit. Improving the efficiency of the cooling system is possible by minimizing the two specified parameters. It is advisable to consider the cooling circuits of the rotor and stator separately. The paper shows that for both cooling circuits, an exhaust circuit with independent cooling circuits of the rotor and stator provides higher efficiency, i.e., lower power consumption for ventilation. In the rotor cooling circuit, this is achieved through the use of a fixed guiding device, which reduces the specific pressure applied to the air in the rotor's pressure elements. This reduces the ventilation heating of the air in the rotor and the cooling air flow rate. With the correct choice of the initial twist value in front of the rotor in a fixed guide device, the influence of the first indicated effect dominates over the second. In the stator cooling circuit, where the limiting hot element is the tooth zone and core winding, the flow separation scheme is more efficient due to the exclusion of exhaust hot air from the gap between the rotor and the stator from further participation in cooling the active parts of the stator. In a multi-chamber forward-flow cooling path, air from the gap is discharged through the cooling channels of the exhaust hot compartments of the stator core, which requires an increased flow rate in the stator cooling circuit to dilute the hot flow of the rotor circuit. This leads to higher power consumption in this cooling scheme and forces the designer to complicate the scheme by introducing additional air coolers and increasing the dimensions of the active parts to reduce specific electrical loads and heat generation.

*Keywords:* turbogenerator, cooling, air, efficiency, ventilation path, guiding device, fan.

*Citation:*

Kartashova T.N., Prokofev A.Yu., Filin A.G., Grishin N.V., Analysis of the efficiency of air-cooled turbogenerators, Global Energy, 31 (03) (2025) 22–44, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31302>

**Введение.** Завод «Электросила», входящий в АО «Силовые машины», обладает многолетним опытом в сфере проектирования и производства турбогенераторов с воздушным охлаждением с применением разнообразных схем вентиляции: одноструйных, многоструйных, схем с разделенными потоками охлаждающего воздуха ротора и статора, а также комбинированных. Решение о применении той или иной схемы принимается на основании мощностного диапазона генератора, а также специфических требований заказчика (ограничение габаритных размеров, параметры генератора, включая параметры охлаждающих сред, и пр.). На сегодняшний день номенклатура указанных выше генераторов завода лежит в диапазоне активной мощности от 5 до 225 МВт, в 2025 году изготовлен турбогенератор мощностью 306 МВт.

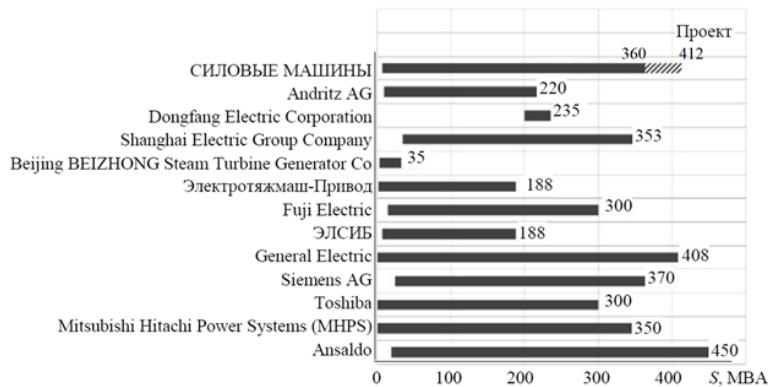


Рис. 1. Мощностной ряд турбогенераторов отечественного и зарубежного производства

Fig. 1. Power range of turbogenerators of Russian and foreign production

Известны крупнейшие отечественные и зарубежные производители турбогенераторов с воздушным охлаждением: НПО ЭЛСИБ, Электротяжмаш-Привод, Русэлпром (Россия), General Electric (США), Siemens AG (Германия), Fuji Electric, Toshiba, Mitsubishi Hitachi Power Systems (Япония), Ansaldo (Италия), Andritz AG (Австрия), Dongfang Electric Corporation, Shanghai Electric Group Company, Beijing BEIZHONG Steam Turbine Generator Co (Китай). На рис. 1 представлен соответствующий мощностной ряд [1].

Конструкция современных мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением, применяемая в мировой практике электромашиностроения, построена на принципе косвенного охлаждения обмотки статора и непосредственного охлаждения обмотки возбуждения. При этом большинство крупных фирм для охлаждения обмотки ротора использует принцип ее самовентиляции за счет различных радиусов вращения на входе в охлаждающие каналы обмотки и на выходе из них: в пазовой части обмотки при помощи радиальных (или аксиально-радиальных) каналов, а в лобовой – аксиальных (внутрипроводниковых) каналов [2–4].

Мощные турбогенераторы разных производителей, представленные на рис. 1, отличаются различным подходом в развитии схем охлаждения с применением одноструйных и многоструйных схем вентиляции, описанных в исследованиях [5–12]. Так, например, фирма MHPG (включая разработки Mitsubishi и Hitachi) предлагает одноструйные нагнетательные схемы, отличающиеся наличием дополнительных воздухоохладителей в замкнутой цепи вентиляции. Toshiba, GE (Alstom), Siemens – многоструйные нагнетательные схемы с различной толщиной пакетов активной стали по длине сердечника статора. Общей технической проблемой, актуальной для многоструйных систем, являются вопросы снижения негативного воздействия встречных воздушных потоков статора и ротора в воздушном зазоре машины, которые решаются различными методами. Так, например, в патенте [13] представлены системы газового охлаждения турбогенератора с аксиальными каналами в зубцовой части статора и вентиляторами, размещенными на валу ротора. В патенте [14] предлагается радиальный канал в пазовой части обмотки ротора с изгибом, в [15, 16] – с наклоном. Применение таких каналов позволяет увеличить поверхность охлаждения обмотки ротора и повысить коэффициент теплоотдачи с поверхности каналов за счет турбулизации потока охлаждающего воздуха. При этом возрастает аэродинамическое сопротивление канала, что может быть полезным для выравнивания скоростей в системе радиальных каналов, снабжаемых газом из подпазового канала. Кроме того, имеются участки на поверхности ротора с отсутствием выпуска газа в зазор между статором и ротором [17].

В конструкциях современных высоконагруженных турбогенераторов большой мощности с полным воздушным охлаждением ведущие мировые производители, стремясь к достижению



актуальных конкурентоспособных характеристик выпускаемого оборудования, при создании турбогенераторов вынуждены применять следующие принципиальные решения:

- использование высокоэффективной системы охлаждения с рациональным распределением общего расхода охлаждающего воздуха по выделенным цепям контура вентиляции при минимальных затратах мощности на циркуляцию воздуха;
- интенсификация охлаждения обмотки и сердечника статора, являющихся наиболее нагруженными в тепловом отношении, в том числе из-за невозможности использования в данной схеме непосредственного охлаждения обмотки статора, поэтому именно указанные элементы зачастую лимитируют мощность машины с воздушным охлаждением;
- принятие конструктивных мер, направленных на снижение механических потерь в генераторе.

Тем не менее при одних и тех же исходных предпосылках выбираемые разными производителями турбогенераторов схемы вентиляции могут быть различны. В общем случае для турбогенераторов с воздушным охлаждением широко распространены три типовые схемы вентиляции: нагнетательная одноструйная схема (НОС), нагнетательная многоструйная схема (НМС) и вытяжная схема с независимыми контурами охлаждения ротора и статора (ВНКО). Предметом настоящего исследования является выявление значимых особенностей данных схем, их преимуществ и ограничений, а также поиск наиболее перспективных схем охлаждения высоконагруженных турбогенераторов с полным воздушным охлаждением.

### **Объекты исследования и методы**

Как было отмечено выше, наибольшее распространение в турбогенераторах с воздушным охлаждением получили три основные схемы.

#### ***Нагнетательная одноструйная схема***

В этой схеме поток воздуха под действием осевых вентиляторов направляется в воздушный зазор между статором и ротором, а также в подбандажное пространство ротора, откуда поступает в охлаждающие каналы обмотки ротора. Из зазора весь поток воздуха, подогретый электрическими вентиляционными потерями ротора, поступает по радиальным каналам сердечника к его периферии и далее через воздухоохладители на вентиляторы.

Данная схема на заводе «Электросила» применяется обычно для турбогенераторов мощностью до 80 МВт, поскольку при ее реализации в центральной части воздушного зазора неизбежно формируется область существенно подогретого воздуха, вызванная значимой долей горячего воздуха ротора в общем объеме охлаждающего воздуха в зазоре. Вследствие чего в центре сердечника образуется наиболее нагретая зона, лимитирующая мощность машины. С учетом всего сказанного данная схема охлаждения не представляет значимого интереса применительно к мощным генераторам с воздушным охлаждением и далее рассматриваться не будет.

#### ***Нагнетательная многоструйная схема и вытяжная схема с независимыми контурами охлаждения ротора и статора***

Сравнение эффективности и области применимости двух последних схем будет являться предметом обсуждения в настоящей статье.

В НМС (серия ТФ завода «Электросила») в воздушном зазоре происходит смешение потоков статора и ротора. По длине сердечника происходит чередование зон подачи охлаждающего воздуха в радиальные охлаждающие каналы из зазора генератора и из-за спинки сердечника (рис. 2).

В ВНКО (серия ТЗФ завода «Электросила») охлаждение обмотки и сердечника статора выполнено без повторного использования подогретого потоками воздуха из воздушного зазора генератора (рис. 3). Подвод и отвод охлаждающего воздуха осуществляются на периферии сердечника статора.

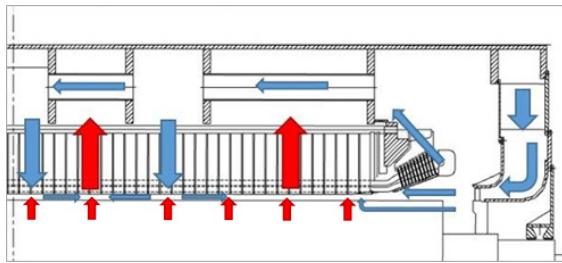


Рис. 2. НМС вентиляции

Fig. 2. Multi-chamber forward-flow ventilation scheme

Особенности последних двух схем охлаждения, применимых к мощным турбогенераторам, приведенные в табл. 1, во многом определяют их эффективность и границы применения.

Таблица 1

**Особенности схем вентиляции**

Table 1

**Features of ventilation schemes**

Схема вентиляции	НМС	ВНКО
Конструктивные особенности		
Тип схемы (нагнетательная / вытяжная)	Нагнетательная – охладитель установлен перед вентилятором	Вытяжная – охладитель установлен после вентилятора
Вентиляционный узел статора и ротора	Осевой вентилятор, один воздушный канал между внутренним и наружным щитами для подачи воздуха в статор и ротор	Центробежный вентилятор, два воздушных канала – для выпуска воздуха из статора и подачи воздуха в ротор
Охлаждение сердечника статора	Радиальные каналы, течение из зазора к периферии (горячая зона) и в обратном направлении (холодная зона)	U-образные каналы с входом и выходом на периферии
Охлаждение обмотки ротора	Система радиальных каналов с аксиальными участками	Система радиальных каналов
Влияние на тепловое состояние		
Величина подогрева воздуха при входе в зону зубцов сердечника (горячая зона – наиболее нагруженная по нагреву)	Подогрев воздуха от вентиляционных потерь в вентиляторе и роторе, электрических потерь в обмотке и на поверхности ротора	Подогрев воздуха потерями в стали ярма сердечника
Подогрев воздуха на входе в каналы обмотки ротора	Подогрев от вентиляционных потерь в вентиляторе и роторе, затраченных на закрутку воздуха от нуля до окружной скорости ротора	Подогрев от вентиляционных потерь в роторе, затраченных на закрутку воздуха от начального значения до окружной скорости ротора

Как будет показано ниже, наиболее значимые конструктивные отличия ВНКО, обеспечивающие ее преимущества над НМС, заключаются в использовании вытяжной схемы с разделенными контурами вентиляции ротора и статора. Это позволяет одновременно улучшить тепловое состояние обмотки и сердечника статора и снизить затраты мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха.

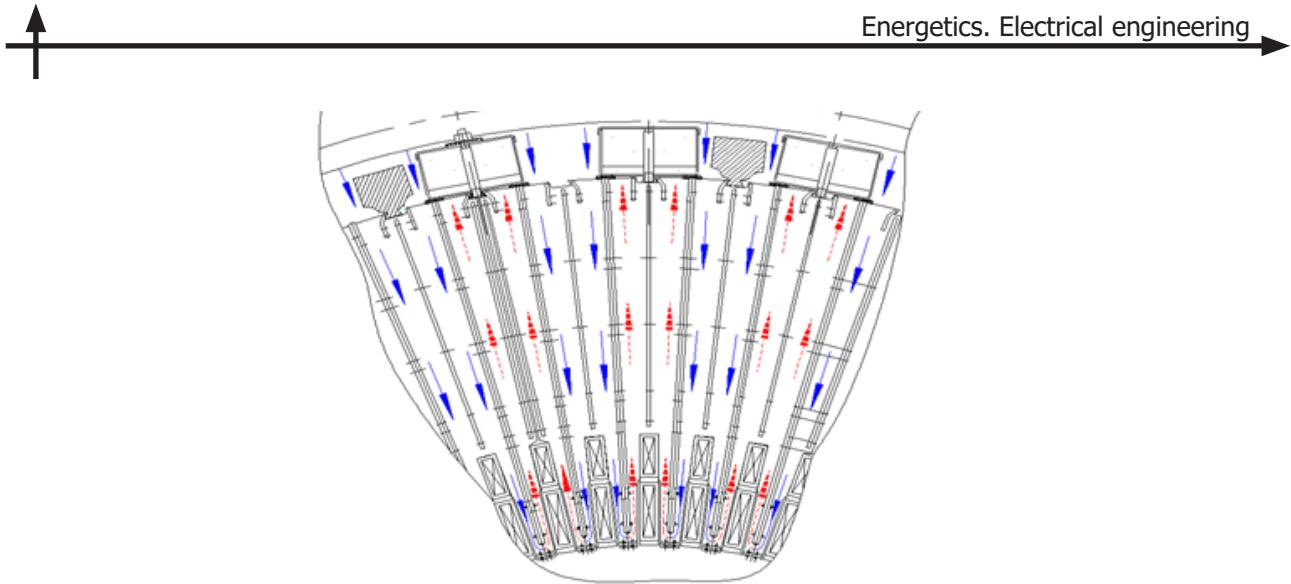


Рис. 3. Схема вентиляции сердечника статора с U-образными каналами

Fig. 3. Ventilation scheme of the stator core with U-shaped channels

#### **Удельные затраты мощности на вентиляцию**

В генераторах с полным воздушным охлаждением около половины всех потерь в машине приходится на механические (вентиляционные) потери в вентиляторах контура охлаждения статора и затраты мощности на прокачку воздуха в охлаждающих каналах обмотки ротора. Поэтому снижение указанных потерь представляется задачей крайне актуальной и является одним из действенных способов повышения КПД турбогенератора.

В ВНКО турбогенераторов с полным воздушным охлаждением производства завода «Электросила» напорными элементами в системе охлаждения, обеспечивающими циркуляцию охлаждающего воздуха, являются центробежные вентиляторы в контуре охлаждения статора и вентиляционные радиальные каналы в обмотке ротора, движение воздуха в которых происходит по самонапорной схеме только за счет различных радиусов вращения при входе в каналы и выходе из них.

В НМС напорными элементами системы охлаждения являются осевые вентиляторы, нагнетающие весь расход охлаждающего воздуха (статора и ротора) в активную зону генератора и вентиляционные радиальные каналы в обмотке ротора, движение воздуха в которых происходит за счет не только центробежного давления каналов ротора, но и давления, развиваемого осевыми вентиляторами, которые установлены последовательно с ротором.

Далее будет исследоваться в том числе и энергетическая эффективность работы напорных элементов контура ротора и статора рассматриваемых схем вентиляции. Здесь под энергетической эффективностью будем понимать соотношение мощности, затраченной на циркуляцию охлаждающего воздуха, к отводимым этим воздухом электрическим потерям в активных частях.

#### **Основные параметры, определяющие вентиляционные потери**

Затраты мощности на циркуляцию воздуха в контуре вентиляции  $N_{\text{вент}}$ , а также его подогрев от вентиляционных потерь  $\Delta\Theta_{\text{вент}}$  определяются следующими уравнениями:

$$N_{\text{вент}} = m * h^* = V * \rho * h^*; \quad h^* = c_{u2} * u_2 - c_{u1} * u_1; \quad \Delta p^* = h^* * \rho * \eta; \quad \Delta\Theta_{\text{вент}} = h^* / c_p,$$

где  $m$ ,  $V$ ,  $\rho$  – массовый и объемный расходы воздуха и плотность воздуха, соответственно;  $h^*$  – удельный напор, т.е. работа, подведенная к единице массы воздуха и затрачиваемая на ее циркуляцию по контуру охлаждения;  $\Delta p^*$  – приращение полного давления воздуха в напорном элементе, имеющем КПД  $\eta$ ;  $u_2$ ,  $u_1$  и  $c_{u2}$ ,  $c_{u1}$  – окружные скорости и окружные компоненты скорости потока на выходе и на входе напорного элемента, соответственно;  $c_p$  – теплоемкость воздуха.

Подогрев воздуха  $\Delta\Theta_{\text{вл}}$  в зоне охлаждаемых им активных частей, обусловленный электрическими потерями  $Q$ , определяется соотношением  $\Delta\Theta_{\text{вл}} = Q / (m * c_p) = Q / (V * \rho * c_p)$ .

Таким образом, из представленных соотношений, справедливых для любой схемы вентиляции, в общем случае можно сделать следующие выводы:

- снижение вентиляционных потерь возможно исключительно за счет уменьшения двух влияющих параметров: массового (объемного) расхода охлаждающего воздуха либо работы, затрачиваемой на циркуляцию единицы массы воздуха, т.е. удельного напора;
- расход воздуха обеспечивает необходимое тепловое состояние активных частей и принимается постоянной величиной для конкретной схемы вентиляции. Отсюда единственным эффективным способом снижения вентиляционных потерь являются совершенствование в аэродинамическом плане всех элементов контура вентиляции и минимизация потерь в них;
- для активных частей, охлаждение которых осуществляется по нагнетательной схеме, возникает дополнительная паразитная составляющая подогрева охлаждающей среды, связанная с механическими (вентиляционными) потерями в вентиляторе  $\Delta\Theta_{\text{вент}}$ , увеличивающаяся с ростом расхода и давления в контуре охлаждения;
- нагнетательная схема обладает очевидным недостатком: чтобы уменьшить подогрев воздуха от отводимых электрических потерь, нужно увеличить расход воздуха и повысить давление вентилятора, но при этом возрастает подогрев воздуха в самом вентиляторе.

Примером рационального использования конфликтующих тенденций изменения нагрева охлаждающего воздуха вентиляционными потерями и его подогрева электрическими потерями в активных частях при варьировании давления и расхода охлаждающего воздуха в современных генераторах с ВНКО является компоновка контура охлаждения ротора, что будет подробно показано далее по тексту.

### К вопросу о тепловом состоянии зубцовой зоны статора

Вне зависимости от выбранной схемы вентиляции наиболее напряженной в тепловом отношении является обмотка статора, имеющая косвенное воздушное охлаждение. Эффективность охлаждения обмотки определяется интенсивностью охлаждения зубцовой зоны сердечника статора, подогреваемой собственными внутренними тепловыделениями и тепловым потоком, поступающим из обмотки статора.

Рассмотрим тепловое состояние зубца сердечника статора в НМС и ВНКО. Причем для НМС будем рассматривать две зоны – холодную, в которой воздух движется из ярма сердечника в зазор, и горячую, где этот воздух, смешавшись в зазоре с воздухом ротора, движется обратно из зазора к периферии сердечника.

При анализе теплового состояния зоны зубца для рассматриваемых схем вентиляции:

- отводимые электрические потери статора и ротора равны;
- поверхность теплоотдачи в охлаждающих каналах статора при НМС и ВНКО одинакова;
- конфигурация охлаждающих каналов горячей и холодной зон в НМС одинакова, при этом более высокий начальный подогрев охлаждающего воздуха горячей зоны частично будет компенсироваться снижением конвективного перепада температур с поверхности охлаждающих каналов благодаря более высокой скорости потока при том же проходном сечении, что обеспечивается добавлением дополнительного расхода воздуха из ротора;
- расход охлаждающего воздуха через ротор, вентиляционные и электрические потери в роторе (а значит, и соответствующие компоненты подогрева воздуха в зазоре со стороны ротора) одинаковы для обеих схем, поскольку давление воздуха, развиваемое радиальными каналами ротора, существенно преобладает над давлением осевых вентиляторов.

При этих допущениях проанализируем влияние расхода воздуха через контур охлаждения статора на тепловое состояние зубцовой зоны (средней температуры стали зубца) центральной части сердечника статора.

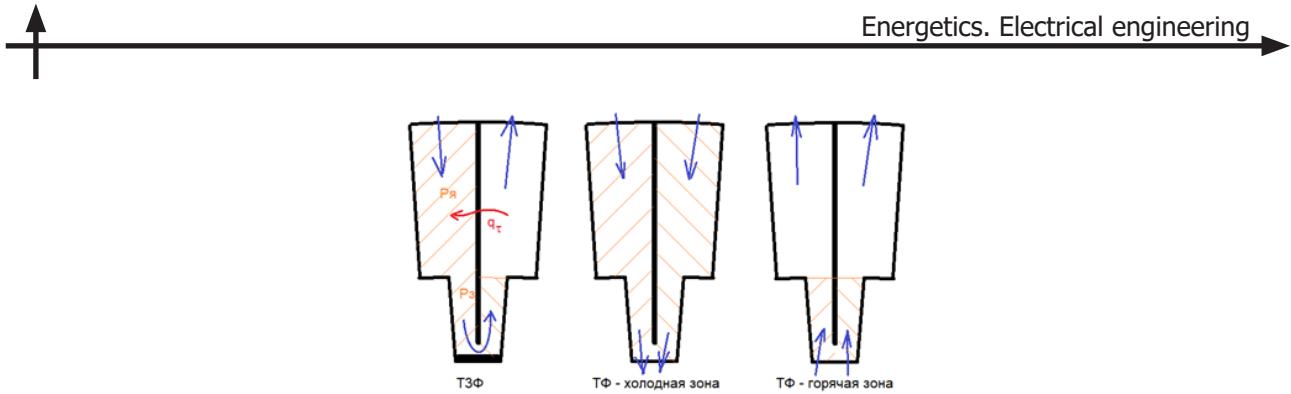


Рис. 4. Схема движения воздуха и выделяемые потери в зоне зубца:  $P_y$  – потери в ярме;  $P_3$  – потери в зубце;  $q_t$  – уравнительный тангенциальный поток

Fig. 4. Diagram of the air movement and the generated losses in the tooth area:  
 $P_y$  – losses in the yoke;  $P_3$  – losses in the tooth;  $q_t$  – equalizing tangential flow

В указанных схемах средняя температура зубцовой зоны определяется с учетом схемы движения воздуха в зоне зубца. Расчетные схемы охлаждения зубцовой зоны представлены на рис. 4.

Расчетное количество теплоты от электрических потерь в сердечнике, определяющее соответствующий подогрев воздуха  $\Delta\Theta_{\text{зл}}$ , будет определяться:

- для ВНКО – потерями, выделяющимися в ярме  $P_y$  и зубце  $P_3$ , с учетом уравнительного теплового потока от выходной горячей к входной холодной зоне U-образного канала, о чём подробнее будет сказано далее;
- для холодной зоны НМС – отводимыми потерями по всей длине пути охлаждающего воздуха во входном радиальном канале ( $P_y$  и  $P_3$ );
- для горячей зоны НМС – потерями только в зубцовой зоне отводящего радиального канала  $P_3$ .

С учетом описанных предпосылок ниже будут рассмотрены подробно принципиальные различия в работе сопоставляемых схем и их влияние на итоговое тепловое состояние наиболее нагруженной по теплу зубцовой зоны.

#### *Оговорка по методам исследования*

При выполнении настоящей работы авторами были использованы как расчетные методы исследования, базирующиеся на теоретическом описании рабочих процессов в системе охлаждения турбогенераторов, так и обобщение доступных опытных данных по турбогенераторам завода «Электросила» различной мощности и с разными схемами охлаждения, накопленных в результате многочисленных испытаний в испытательном центре завода. Как будет показано ниже, результаты, полученные по обеим описанным методикам, хорошо согласуются друг с другом и демонстрируют тем самым корректность принятых исходных допущений и разработанных расчетных схем.

## **Результаты работы**

### **Контур охлаждения ротора: особенности компоновок НМС и ВНКО и их энергетическая эффективность**

Итак, сопоставлению подлежит эффективность двух типовых схем охлаждения ротора: НМС и ВНКО. Рассматривается вопрос: какая из двух схем обладает большей энергетической эффективностью, т.е. требует меньших затрат мощности на вентиляцию для обеспечения заданного допустимого значения температуры обмотки возбуждения ротора.

НМС, в отличие от ВНКО, содержит два последовательно установленных напорных элемента в контуре охлаждения ротора – осевой вентилятор, пропускающий через себя воздух обоих контуров охлаждения (статора и ротора), а также сам ротор с радиальными вентиляционными



каналами в обмотке возбуждения. По затратам мощности на охлаждение ротора НМС претендует быть более энергозатратной за счет последовательной установки двух указанных источников давления. В действительности ситуация с распределением вентиляционных потерь в напорных элементах контура ротора НМС и ВНКО выглядит несколько сложнее, и, чтобы разобраться в этом, необходим детальный анализ взаимодействия всех последовательно установленных элементов контуров вентиляции, включая неподвижные элементы входных воздухоподводящих участков.

Схематично процессы подвода работы напорными элементами и преобразования статического давления  $p$  и динамического давления  $p_d = \rho * c^2 / 2$  в напорных и неподвижных элементах вентиляционных узлов НМС и ВНКО представлены на рис. 5. При этом, анализируя далее преобразования динамического давления потока (или кинетической энергии) в статическое и обратно, будем пренебречь изменением расходной компоненты скорости воздуха, так как она меняется незначительно в сравнении с окружной, а также не будем учитывать наличие незначительных потерь в элементах конструкции генератора, которые в действительности всегда присутствуют в любой схеме вентиляции. Таким образом, будем считать в первом приближении, что для неподвижных элементов контура полное давление  $p^* = p + \rho * c^2 / 2$  сохраняется и на изменение составляющих  $p$  и  $\rho * c^2 / 2$  оказывает влияние исключительно окружная компонента  $c_u$ .

По оси абсцисс графика нанесены последовательно расположенные элементы, входящие в состав вентиляционных узлов контура охлаждения ротора НМС и ВНКО. Первым элементом по ходу движения потока является осевой вентилятор (ОВ) для схемы ТФ и неподвижный направляющий аппарат (ННА) для схемы ТЗФ (на рис. 5 обозначен как ТЗФННА). Здесь стоит отметить, что в первых версиях генераторов типа ТЗФ ННА не устанавливался (обозначен как ТЗФ на рис. 5), поток воздуха подавался к ротору по осесимметричному радиальному каналу без лопаток в нем.

Таким образом, в НМС с ОВ к проходящему через него воздуху подводится удельный напор  $h^*$ , при этом повышается полная температура воздуха, увеличиваются закрутка потока  $c_u$ , а также статическое давление  $p$ . В ВНКО, вне зависимости от наличия или отсутствия вращающегося направляющего аппарата (ВНА), подвода работы к воздуху на этом участке его пути не происходит:  $h^* = 0$ .

При этом в классической ВНКО без ННА поток воздуха движется свободно по осесимметричному подводящему каналу между двумя радиальными щитами. Его изначально нулевая закрутка и начальное статическое давление в этом случае не меняются. Но в ВНКО с ННА происходит закрутка потока в сторону вращения ротора под воздействием неподвижных лопаток ННА, при этом при оговоренном условии сохранения полного давления  $p^* = p + \rho * c^2 / 2$  статическое давление неизбежно падает вместе с ростом динамического, связанным с увеличением окружной компоненты скорости воздуха  $c_u$ .

Далее происходит перемещение воздуха с радиуса установки ОВ на радиус входа в подбандажное пространство ротора, он же – радиус установки ВНА в ВНКО. Во всех трех вариантах этот участок является свободным от каких-либо вращающихся или неподвижных лопаточных аппаратов, поэтому на нем действует закон сохранения начальной циркуляции потока воздуха:

$$c_u * u = c_u * (\omega * R) = \text{const},$$

где  $u$  – окружная скорость воздуха на радиусе  $R$  при угловой скорости вращения ротора  $\omega$ .

Единственным конструктивным отличием является то, что в НМС поток воздуха преодолевает при этом свободное пространство камеры лобовых частей обмотки статора от выхода ОВ до входа в подбандажное пространство ротора, а в ВНКО он движется по явно выраженному подводящему каналу, образованному внутренней и наружной стенками, что не будет оказывать

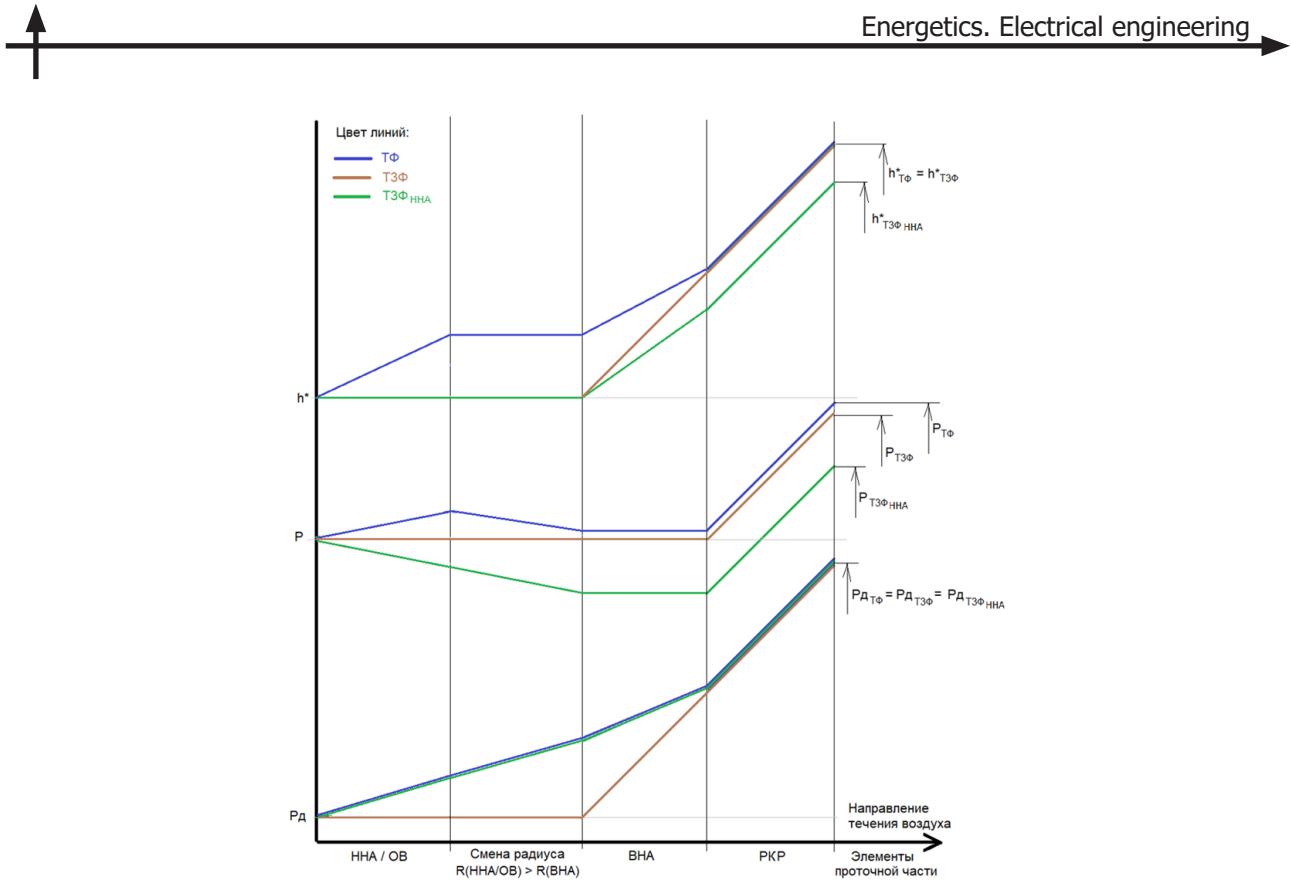


Рис. 5. Подвод работы и изменение статического и динамического давления в элементах вентиляционных узлов схем ТФ и ТЗФ:  $h^*$  – подводимая механическая работа;  $p$  – статическое давление воздуха;  $p_d = \rho * c^2 / 2$  – динамическое давление воздуха; ННА – неподвижный направляющий аппарат; ОВ – осевой вентилятор; ВНА – вращающийся направляющий аппарат; РКР – радиальные каналы ротора

Fig. 5. Supply of work and changes in static and dynamic pressure in the elements of the ventilation units of the TF and T3F circuits:  $h^*$  – supplied mechanical work;  $p$  – static air pressure;  $p_d = \rho * c^2 / 2$  – dynamic air pressure; HNA (NNA) – fixed guiding device; OB (OV) – axial fan; BHA (VNA) – rotating guiding device; PKR (RKR) – radial channels of the rotor

значимого влияния на закон изменения окружной скорости потока по радиусу. Однако движение через пространство камеры лобовых частей может служить причиной дополнительных потерь внезапного расширения потока воздуха после вентилятора и внезапного его сужения при входе в подбандажное пространство ротора, что может способствовать некоторому снижению эффективности НМС.

С учетом вышеизложенных предпосылок в классической ВНКО без ННА все еще незакрученный поток воздуха продолжает свободно двигаться без какого-либо воздействия на него по осесимметричному подводящему каналу, переходя с большего радиуса на меньший, к сечению входа в подбандажное пространство ротора, при этом не меняя изначально нулевой закрутки и сохраняя значения статического и динамического давления.

В ВНКО с ННА и в НМС поток воздуха, переходящий с большего радиуса на меньший и имеющий при этом ненулевую начальную компоненту окружной скорости, разгоняется до большего значения  $c_u$ , и, соответственно, динамическое давление при этом повышается, а статическое падает с сохранением полного давления потока.

Далее по ходу движения потока во всех трех схемах следует ВНА, роль которого в НМС исполняют обычно входные участки подпазовых каналов ротора, что не изменяет роль данного элемента – дозакручивание потока до окружной скорости ротора при входе в подпазовые каналы. И как показывают проведенные расчеты, как подпазовые каналы, так и традиционно



используемый ВНА (являющийся одновременно конструктивным элементом для закрепления центробежного вентилятора контура охлаждения статора), не обладая аэродинамически совершенной формой, обеспечивают исключительно дозакрутку потока до скорости ротора, но не способствуют повышению статического давления воздуха. Поэтому изменение статического давления в данном элементе во всех рассматриваемых вариантах отсутствует, а динамическое давление на выходе из ВНА у всех вариантов становится одинаковым и определяется окружной скоростью потока на среднем радиусе входа в подбандажное пространство ротора. Сказанное означает, что, как бы ни был закручен поток до этого момента предшествующими элементами контура, имея здесь любое произвольное значение циркуляции потока  $c_u^* u$ , итоговая закрутка на выходе из него будет определяться квадратом окружной скорости на радиусе подпазового канала  $u_{pk}^2$ . Также важным обстоятельством является то, что в НМС на участке между ОВ и ВНА (подпазовыми каналами в данном случае) закрутка потока какими-либо вращающимися или неподвижными элементами не осуществлялась, его циркуляция  $c_u^* u$  оставалась неизменной. То есть итоговое приращение закрутки потока в НМС и ВНКО без ННА, а значит, и суммарный напор  $h^*$  этих элементов будут одинаковы. Таким образом, последовательная работа осевого вентилятора и ВНА никак не отразилась на подводимой к воздуху работе.

Далее во всех трех вариантах воздух проходит в подпазовые каналы и прокачивается через РКР (рис. 5), являющиеся основным напорным элементом в данной цепи. Здесь повышается температура воздуха, а также происходит одновременное повышение окружной скорости и статического давления. Во всех трех рассматриваемых схемах прирост указанных параметров потока будет одинаков. Таким образом, эффективность той или иной схемы определяется именно взаимодействием предшествующих рассмотренных выше элементов.

С учетом всего вышесказанного применительно к контуру охлаждения ротора можно подытожить следующие закономерности:

- удельный напор, затраченный на циркуляцию единицы массы воздуха в НМС и ВНКО без ННА, будет одинаков;
- прирост статического давления в НМС оказывается не столь значительным, несмотря на гораздо большую эффективность ОВ, повышающего и давление, и скорость, в сравнении с ВНА, только лишь ускоряющим поток;
- при несколько большем давлении напорных элементов в НМС уровень потерь в данной схеме также будет выше, что в итоге даст примерно то же значение расхода и те же затраты мощности, как и в базовой ВНКО без ННА;
- единственной схемой, обеспечивающей снижение вентиляционных потерь, является ВНКО с ННА;
- переходя к температуре активных частей ротора, т.е. обмотки возбуждения, можно отметить, что влияние на нее будут оказывать два слагаемых: подогрев воздуха от вентиляционных потерь  $\Delta\Theta_{вент}$ , пропорциональный напору  $h^*$ , и подогрев воздуха от электрических потерь  $\Delta\Theta_{эл}$ , обратно пропорциональный расходу, а значит, и тому же напору  $h^*$ . Именно нахождением разумного компромисса между этими противоположно направленными эффектами и обеспечивается высокая эффективность современной ВНКО, включающей ННА и ВНА в контуре вентиляции ротора. Подробно данный вопрос рассмотрен в [16]. Представим основные результаты расчетного исследования на рис. 6. По горизонтальной оси здесь отложена безразмерная окружная скорость воздушного потока во входном сечении ВНА, формируемая предшествующим ННА:  $k = c_{u1} / u_1$ .

Выполненные расчеты показывают, что для характерных рабочих значений окружной скорости ротора, тепловыделений в обмотке и расхода воздуха на охлаждение ротора одновременное возрастание  $\Delta\Theta_{эл}$  и падение  $\Delta\Theta_{вент}$  подчиняются следующей закономерности: их сумма  $\Delta\Theta_m = \Delta\Theta_{эл} + \Delta\Theta_{вент}$ , которая как раз и определяет подогрев обмотки относительно охлаждающего

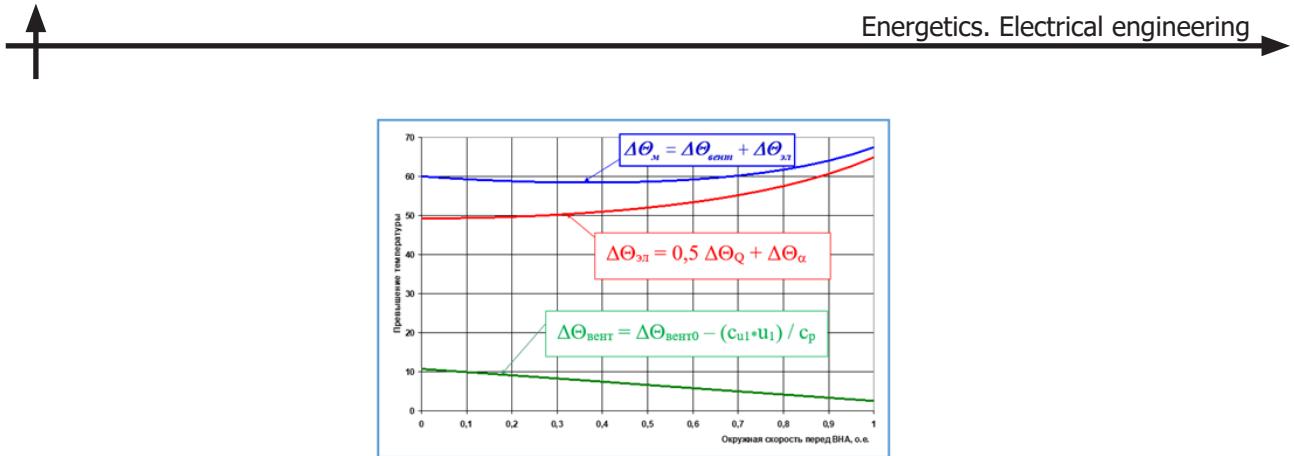


Рис. 6. Превышения температуры в зависимости от окружной скорости перед ВНА

Fig. 6. Temperature rise depending on the circumferential velocity in front of the rotating guide device

воздуха, вначале несколько снижается и только затем начинает расти. Данное поведение результирующей зависимости  $\Delta\Theta_m$  позволяет отметить на ней следующие точки, имеющие важное значение для практического применения:

- $k \approx 0,35$  – в этом случае закрутка воздуха на входе в ВНА обеспечивает минимально возможную температуру обмотки при одновременном уменьшении затрат мощности на вентиляцию относительно базового варианта ( $k = 0$ );
- $k \approx 0,7$  – здесь закрутка воздуха на входе в ВНА обеспечит ту же температуру обмотки, как у базового варианта без начальной закрутки ( $k = 0$ ), но с ощутимым снижением затрат мощности на 20–30% относительно базового варианта с  $k = 0$ .

На практике обычно больший интерес представляет второй вариант, дающий снижение вентиляционных потерь около 25% при сохранении исходного теплового состояния обмотки ротора.

Представленные на рис. 6 результаты расчета полностью согласуются с результатами натурных испытаний, представленных на рис. 7.

Из представленного рисунка видно, что:

- начальное значение температуры обмотки при нулевой мощности (квадрате тока ротора), связанное исключительно с вентиляционным подогревом, т.е. как раз удельными потерями на вентиляцию, заметно меньше у схемы с ННА;
- угол наклона зависимости  $\Delta\Theta_m$  от квадрата тока ротора больше у схемы с ННА, что связано с меньшим расходом охлаждающего воздуха через ротор;
- на номинальном режиме работы за счет встречного действия обоих отмеченных эффектов схема с ННА обеспечивает то же тепловое состояние, что и у варианта исходной конструкции без ННА.

#### Оценка теплового состояния зубцовой зоны статора

Если говорить о составляющих превышения температуры зубца над температурой охлаждающего воздуха, выходящего из воздухоохладителя, то для перечисленных выше схем охлаждения зубцовой зоны, представленных на рис. 6, можно выделить следующие компоненты:

1. Перепад температуры по толщине пакета  $\Delta\Theta_\lambda$ , одинаковый для всех сравниваемых схем, не зависящий от расхода или скорости охлаждающего воздуха, а определяемый исключительно геометрическими размерами зубца, его теплопроводностью и отводимыми потерями.
2. Конвективный перепад температуры с охлаждаемой поверхности пакета  $\Delta\Theta_\alpha$ , обратно пропорциональный коэффициенту теплоотдачи  $\alpha$ , который, в свою очередь, при развитом турбулентном режиме течения пропорционален скорости потока в степени 0,8.
3. Подогрев воздуха в зубцовой зоне  $\Delta\Theta_{эл}$ , определяющийся отводимыми потерями  $P$  в активных частях по пути следования воздуха через зубцовую зону и расходом воздуха  $V$ :  $\Delta\Theta_{эл} = P / (\rho * V * c_p)$ .

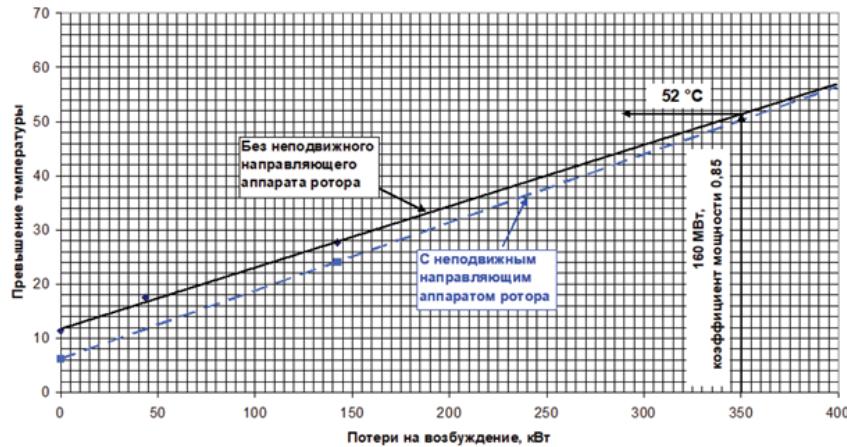


Рис. 7. Результаты испытаний турбогенераторов с ННА и без него

Fig. 7. Test results of turbogenerators with and without fixed guiding device

Сопоставим компоненты подогрева воздуха для рассматриваемых схем вентиляции:

- для ВНКО:  $\Delta\Theta_{T3ФЭЛ} = (P_я + P_з + q_τ) / (\rho * V * c_p)$ ;
- в холодной зоне НМС:  $\Delta\Theta_{TФХЗ.ЭЛ} = (P_я + 0,5 * P_з) / (\rho * V_{x3} * c_p)$ ;
- в горячей зоне НМС:  $\Delta\Theta_{TФГЗ.ЭЛ} = 0,5 * P_з / (\rho * V_{г3} * c_p)$ ,

где  $V_{x3}$  и  $V_{г3}$  – расходы воздуха в каналах холодной и горячей зоны НМС. Здесь следует уточнить, что данные расходы существенно отличаются, так как к расходу холодной зоны  $V_{x3}$  в горячей зоне добавляется расход, пришедший в зазор из охлаждающих каналов ротора  $V_p$ :  $V_{г3} = V_{x3} + V_p$ .

Причем суммарный подогрев охлаждающего воздуха в горячей зоне тепловыделениями в сердечнике статора в НМС, если его условно просуммировать по обеим зонам, должен составлять:

$$\Delta\Theta_{TФХЗ.ЭЛ} + \Delta\Theta_{TФГЗ.ЭЛ} = (P_я + 0,5 * P_з) / (\rho * V_{x3} * c_p) + 0,5 * P_з / (\rho * V_{г3} * c_p),$$

что, как следует из формулы, должно быть меньше, чем подогрев воздуха в ВНКО, сразу по двум причинам:

- 1) расход воздуха  $V_{г3}$  в горячих (выходных) отсеках статора должен быть выше, чем расход  $V_{x3}$  во входных холодных отсеках, соизмеримый с расходом ВНКО, за счет подмеса расхода из контура ротора  $V_p$ :  $V_{г3} = V_{x3} + V_p$ ;
- 2) на подогрев воздуха в НМС не оказывает дополнительного негативного влияния паразитный тепловой поток  $q_τ$ , свойственный только ВНКО.

Тем не менее оба этих обстоятельства, как будет показано ниже, неспособны обеспечить в итогенюю эффективность НМС из-за ее существенного проигрыша перед ВНКО по другим составляющим превышения температуры.

4. Начальный подогрев охлаждающего воздуха  $\Delta\Theta_0$  относительно температуры на выходе из охладителя. Данная составляющая превышения температуры зубца над холодным воздухом охладителя различается в приведенных схемах вентиляции наиболее существенно и требует подробного рассмотрения.

4.1. ВНКО. В данной схеме удается избежать начального подогрева, воздух сразу после охладителя поступает непосредственно в охлаждающие каналы сердечника статора, поэтому  $\Delta\Theta_0 = 0$ . Это является наиважнейшей отличительной особенностью данной схемы, обеспечивающей ее преимущество по тепловому состоянию зубцовой зоны над схемами-конкурентами.



4.2. НМС, холодная (входная) зона. Здесь на начальный подогрев охлаждающего воздуха оказывают влияние сразу два фактора:

1) Имеет место начальный подогрев охлаждающего воздуха в вентиляторе контура статора, свойственный любой нагнетательной схеме:  $\Delta\Theta_{\text{вент}} = h^* / c_p = \Delta p^* / (\rho * c_p * \eta)$ . КПД вентилятора  $\eta$  в НМС обычно имеет относительно небольшие значения из-за используемой компоновки узла вентилятора, не имеющего в своем составе отводящий диффузор за вентилятором. В этом случае скоростной поток воздуха выбрасывается непосредственно в камеру лобовых частей обмотки статора, что неизбежно приводит к потерям давления воздуха при его внезапном расширении. Данное обстоятельство способствует дополнительному росту  $\Delta\Theta_{\text{вент}}$  даже при умеренном значении напора вентилятора. Также здесь важно отметить, что данная компонента при прочих равных будет изменяться пропорционально второй степени расхода воздуха через вентилятор  $V$  в соответствии с законом изменения перепада давления  $\Delta p^*$ , необходимого для циркуляции расхода  $V$  по контуру охлаждения статора, и имеющим квадратичную зависимость от расхода:  $\Delta\Theta_{\text{вент}} \sim \Delta p^* \sim V^2$ .

2) Появляется добавочная компонента начального подогрева воздуха холодной зоны, обусловленная его проходом после вентилятора через камеру лобовых частей обмотки статора, где воздух поглощает часть электромагнитных тепловыделений, выделяющихся в лобовых частях обмотки статора, в конструктивных элементах торцевой зоны сердечника и корпуса статора, нагреваясь при этом на некоторое значение  $\Delta\Theta_{0\text{эл}}$ , вносящее свой негативный вклад в эффективность данной схемы. При этом, как и подогрев воздуха от электрических потерь в сердечнике статора, указанный начальный подогрев воздуха будет изменяться при прочих равных обратно пропорционально расходу воздуха:  $\Delta\Theta_{0\text{эл}} \sim 1 / V$ .

Таким образом, для холодной зоны НМС начальный подогрев воздуха представляет собой сумму вентиляционного подогрева и подогрева от электрических потерь в зоне лобовых частей обмотки:  $\Delta\Theta_0 = \Delta\Theta_{\text{вент}} + \Delta\Theta_{0\text{эл}}$ . Соответственно, складывается двойственная взаимосвязь начального подогрева охлаждающего воздуха с его расходом: повышение расхода воздуха ведет, с одной стороны, к росту его нагрева в вентиляторе, но с другой – к снижению его начального подогрева тепловыделениями от электрических потерь в зоне лобовых частей. При этом влияние вентиляционного подогрева более выражено, поскольку зависимость квадратичная.

4.3. НМС, горячая (выходная) зона. Здесь начальный подогрев формируется как результат смешения двух воздушных потоков, поступающих в зазор: поток из холодных (входных) отсеков статора и поток охлаждения ротора, каждый из которых имеет при входе в зазор свой расход и температуру. Их соотношения и определяют параметры воздушной смеси в зазоре, поступающей затем в вентиляционные каналы горячей зоны статора.

Подогрев воздуха в зазоре над температурой холодного воздуха за охладителем после смешения потоков статора и ротора определяется соотношением:

$$\Delta\Theta_3 = \frac{\Delta\Theta_{x3} * V_{x3} + \Delta\Theta_p * V_p}{V_{x3} + V_p} = \frac{(\Delta\Theta_{T\Phi x3, \text{эл}} + \Delta\Theta_{\text{вент}} + \Delta\Theta_{0\text{эл}}) * V_{x3} + (\Delta\Theta_{p, \text{вент}} + \Delta\Theta_{p, \text{эл}}) * V_p}{V_{x3} + V_p},$$

где индексом «р» отмечены компоненты подогрева воздуха в роторе и расход через ротор, а индексом «x3» – «холодная» зона.

На практике получается, что из входящих в данную формулу составляющих начального подогрева охлаждающего воздуха для горячей зоны сердечника статора основную негативную роль оказывают компоненты подогрева роторного потока, в то время как воздух, поступающий в зазор из холодных зон статора, использование данной схемы охлаждения столь существенно не ограничивает. Отмеченное обстоятельство объясняется крайне высоким значением вентиляционного подогрева воздуха  $\Delta\Theta_{p, \text{вент}}$  при его проходе через напорные элементы ротора, подвод

работы в которых был подробно разобран выше. Действительно, если вернуться к приведенной в начале настоящей статьи формуле напора, то применительно к ротору будем иметь:

$$h^* = c_{u2} * u_2 - c_{u1} * u_1 = u_2^2,$$

что при характерных размерах роторов и соответствующих им значениях окружной скорости  $u_2$  на периферии ротора на уровне 160...190 м/с будет давать вентиляционный подогрев воздуха порядка 30°C, что соизмеримо с нагревом воздуха электрическими потерями в обмотке ротора. Таким образом, «цена» воздуха, охлаждающего обмотку ротора, крайне высока, затраты на вентиляцию практически удваивают потери в роторе.

Сказанное подтверждает гистограмма на рис. 8, где представлены удельные вентиляционные потери в статоре и роторе турбогенераторов с воздушным охлаждением серий ТФ и ТЗФ различной активной мощности, т.е. отношение вентиляционных потерь на циркуляцию воздуха в контурах охлаждения статора и ротора к электрическим потерям в активных частях статора и ротора. Также нужно отметить, что расчет выполнен для схем ТФ и ТЗФ без установки ННА.

Из представленных графиков видно, что:

- удельные затраты мощности на охлаждение ротора составляют в среднем 100...120% от отводимых электрических потерь, т.е. даже превышают их. При этом установка ННА позволила бы, безусловно, заметно снизить вентиляционные потери в роторе, сделав их несколько меньше электрических потерь, но и в этом случае они оставались бы соизмеримы с последними;
- удельные затраты мощности на охлаждение статора составляют в среднем лишь 30...40% от электрических потерь в активных частях сердечника, что в 3 раза ниже, чем в роторе.

Отсюда вытекают следующие принципиально важные выводы:

• воздух, выходящий из каналов ротора в зазор, является уже полностью «отработанным», он не способен обеспечить сколь-либо значимое охлаждение активных частей сердечника в горячих отсеках. Его выпуск через сердечник из зазора на периферию – это в первую очередь вынужденная мера, ограничение, существенный недостаток данной схемы вентиляции, но не полезное использование дополнительного располагаемого расхода. При этом, так как охлаждающий воздух, проходя по подпазовому каналу от торца ротора к его середине значительное расстояние, прогревается по пути следования стенками подпазового канала и в середине зазора имеет максимальную температуру, это обстоятельство дополнительно усугубляет тепловое состояние сердечника именно в середине машины;

• единственным разумным механизмом снижения температуры зубцовой зоны в горячих отсеках сердечника статора является повышение расхода воздуха именно через контур вентиляции статора, так как именно это решение позволяет снизить итоговую температуру смеси потоков в зазоре, но при этом оно частично нивелируется возрастающим вентиляционным подогревом воздуха в контуре статора, что было отмечено выше в п. 4.2, причем с некоторого момента дальнейшее повышение расхода перестанет давать значимый эффект и, более того, далее может привести к росту температуры из-за стремительно растущего вентиляционного подогрева, пропорционального квадрату расхода:  $\Delta\Theta_{\text{вент}} \sim \Delta p^* \sim V^2$ . Таким образом, и этот единственный путь для НМС имеет свои ограничения.

Отмеченные недостатки НМС определяют эффективный диапазон ее применимости. Будучи конструктивно более простой, она широко используется в турбогенераторах производства завода «Электросила» в диапазоне мощностей до 80...110 МВт. Но при более высоких значениях мощности переход к современной схеме ТЗФ с установкой ННА в контуре охлаждения ротора становится крайне предпочтительным, если не безальтернативным. Разумеется, расширение диапазона применения НМС при использовании ряда технических приемов возможно, многие из известных производителей оборудования идут именно по этому пути ради упрощения

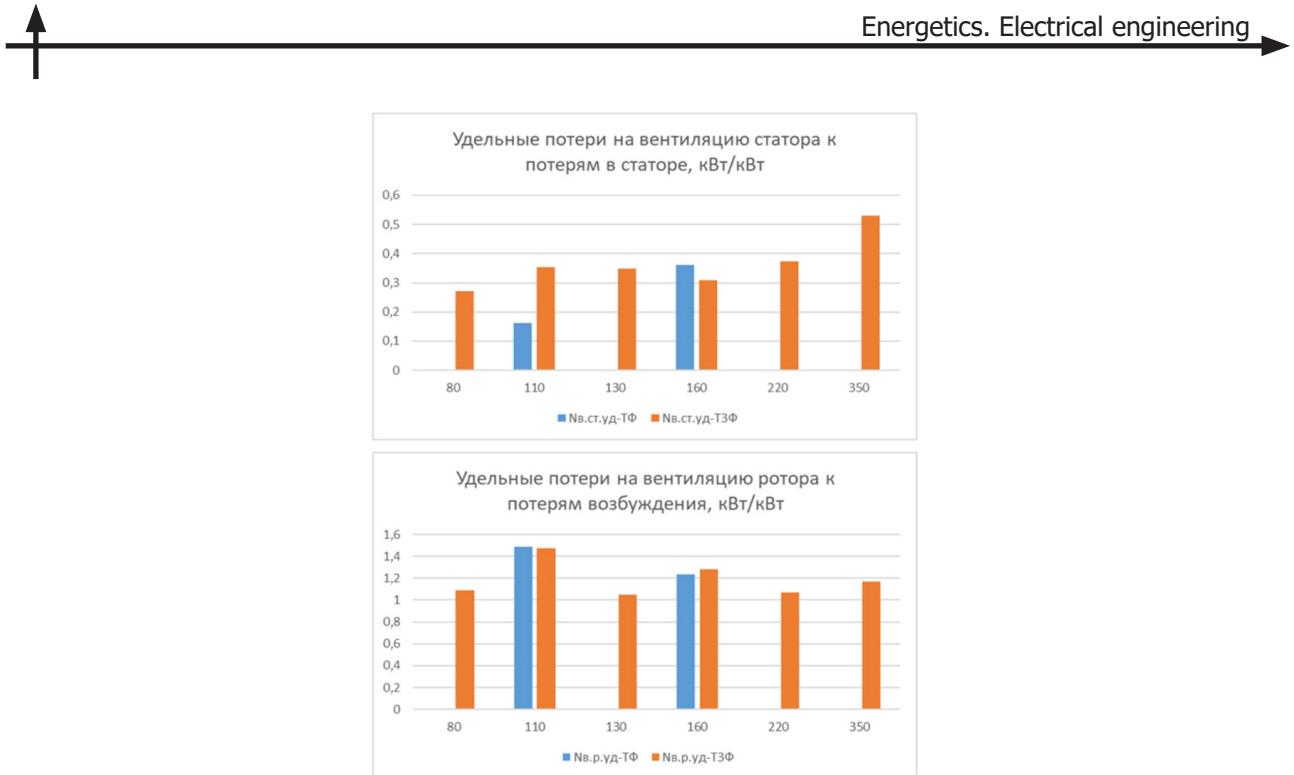


Рис. 8. Удельные потери на охлаждение статора  $N_{в.ст.уд}$  (вверху) и ротора  $N_{в.р.уд}$  (внизу) для схем ТФ (синий цвет) и ТЗФ (оранжевый цвет), отнесенные к их электрическим потерям, соответственно

Fig. 8. Specific cooling losses of the stator  $N_{в.ст.уд}$  (top) and rotor  $N_{в.р.уд}$  (bottom) for TF (blue) and T3F (orange) circuits, related to their electrical losses, respectively

конструкции. Но ничего не достается «бесплатно». Для обеспечения работоспособности НМС приходится усложнять конструкцию статора, устанавливая дополнительные промежуточные охладители в контуре охлаждения, либо выполнять горячие зоны сердечника более «рыхлыми», изменяя для них соотношение толщины пакетов стали и ширины воздушного зазора в пользу последнего, что приводит к увеличению размеров активной части сердечника. Кроме того, ради упрощения схемы, сокращения числа ходов воздуха в щитах приходится идти на увеличение расхода охлаждающего воздуха в контуре охлаждения статора, а также на снижение удельных нагрузок на активные части. В качестве примера на рис. 9 приведено сравнение некоторых удельных характеристик для турбогенераторов серий ТФ и ТЗФ различной мощности: удельного расхода воздуха на один мегаватт номинальной мощности и удельной номинальной мощности на единичный объем сердечника статора. Из представленного сравнения следует, что переход к менее эффективной схеме ТФ вынуждает конструктора идти на повышение расхода охлаждающего воздуха в контуре охлаждения статора и вместе с тем снижать удельную мощность на единичный объем активных частей сердечника, а значит, увеличивать габариты и массу активных частей машины.

Все рассмотренные выше компоненты подогрева, формирующие температуру зубца сердечника статора в НМС и ВНКО, для наглядности сведены в табл. 2. Следует отметить, что негативное влияние на начальный подогрев охлаждающего воздуха от паразитного перетока тепла  $q_t$  в ВНКО оказывается всегда существенно меньше, чем суммарный подогрев воздуха при входе в горячую зону сердечника, обусловленный нагревом воздуха в вентиляторах, лобовых частях обмотки статора и конструктивных элементах статора, а главным образом – в роторе при использовании НМС.

Таблица 2

**Компоненты превышения температуры зубца  
над температурой охлаждающего воздуха в НМС и ВНКО**

Table 2

**Components of the excess of the temperature of the tooth above the temperature  
of the cooling air in the schemes of multi-chamber forward-flow cooling scheme  
and independent cooling circuits for the rotor and stator**

Схема	ВНКО (Т3Ф)	НМС (ТФ) – холодная	НМС (ТФ) – горячая
Начальный подогрев			
В вентиляторе	Отсутствует	$\Delta\Theta_{вент} = h^* / c_p = \Delta p^* / (\rho * c_p * \eta) \sim V^2$	$\Delta\Theta_{вент} = h^* / c_p = \Delta p^* / (\rho * c_p * \eta) \sim V^2$ через зазор
Начальный электропотерями	Отсутствует	$\Delta\Theta_{0_{эл}} \sim 1 / V$	$\Delta\Theta_{0_{эл}} \sim 1 / V$ через зазор
В зазоре	Отсутствует	Отсутствует	$\Delta\Theta_3 = \frac{\Delta\Theta_{x3} * V_{x3} + \Delta\Theta_p * V_p}{V_{x3} + V_p}$
Подогрев электропотерями в сердечнике			
Суммарный подогрев	$\Delta\Theta_{T3Ф_{эл}} = (P_{я} + P_3 + q_t) / (\rho * V * c_p)$	$\Delta\Theta_{TФx3,эл} = (P_{я} + 0,5 * P_3) / \rho * V_{x3} * c_p$	$\Delta\Theta_{TФ3,эл} = 0,5 * P_3 / (\rho * V_{г3} * c_p)$
Паразитный переток	$q_t$	Отсутствует	Отсутствует
Составляющие теплопередачи			
Конвективный перепад	$\Delta\Theta_{a(T3Ф)}$	$\Delta\Theta_a > \Delta\Theta_{a(T3Ф)} –$ скорость ниже	$\Delta\Theta_a < \Delta\Theta_{a(T3Ф)} –$ скорость выше
поперек пакета	$\Delta\Theta_\lambda$ – одинаков для всех вариантов		

### Обсуждение

#### *Сравнение характеристик и технико-экономических показателей турбогенераторов с НМС и ВНКО*

Представленные ниже на рис. 9–12 зависимости на примере серий ТФ и Т3Ф завода «Электросила» подтверждают полученные в настоящем исследовании закономерности:

- машинная постоянная Арнольда, характеризующая удельные габариты машины на ее единичную мощность, выше для турбогенераторов серии ТФ, что полностью согласуется с ранее представленным графиком на рис. 9, где сопоставлялась близкая по смыслу обратная величина для серий ТФ и Т3Ф – удельная активная мощность на единицу объема сердечника статора;
- удельный вес одного мегавольт-ампера полной мощности для турбогенераторов серии ТФ оказывается заметно выше, нежели чем у Т3Ф, что также согласуется с ранее представленными результатами на рис. 9 с обратной величиной – удельной активной мощностью на единицу объема сердечника статора;
- наконец, КПД турбогенераторов серий ТФ и Т3Ф, как результат итогового влияния всех отмеченных закономерностей, демонстрирует однозначное превосходство серии Т3Ф, что

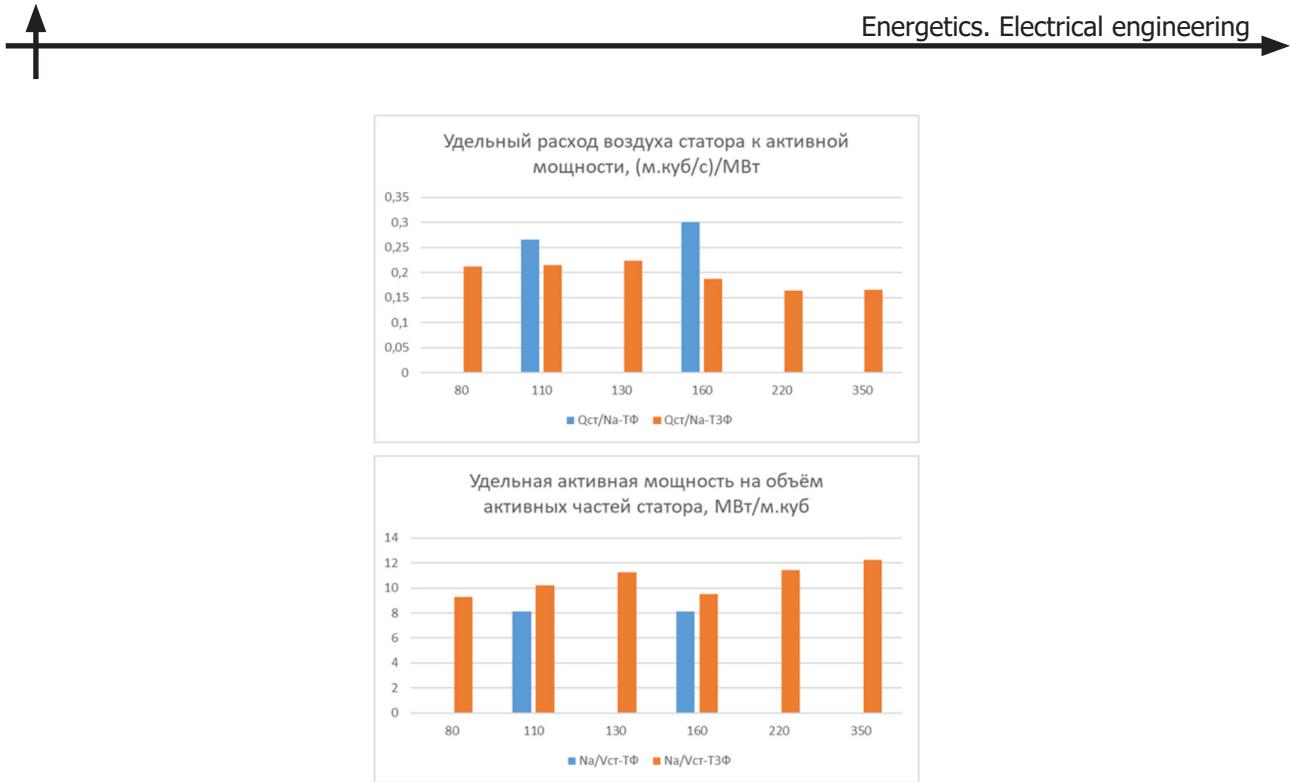


Рис. 9. Удельный расход воздуха на охлаждение сердечника статора единичной активной мощности  $Q_{ct}/N_a$ , ( $\text{м}^3/\text{s}$ )/МВт (вверху) и удельная активная мощность к единичному объему сердечника статора  $N_a/V_{ct}$  (внизу) для схем ТФ (синий цвет) и ТЗФ (оранжевый цвет), соответственно

Fig. 9. Specific air flow for cooling the stator core of a single active power  $Q_{ct}/N_a$ , ( $\text{m}^3/\text{s}$ )/MW (top) and specific active power to the unit volume of the stator core  $N_a/V_{ct}$  (bottom) for TF (blue) and T3F (orange) circuits, respectively

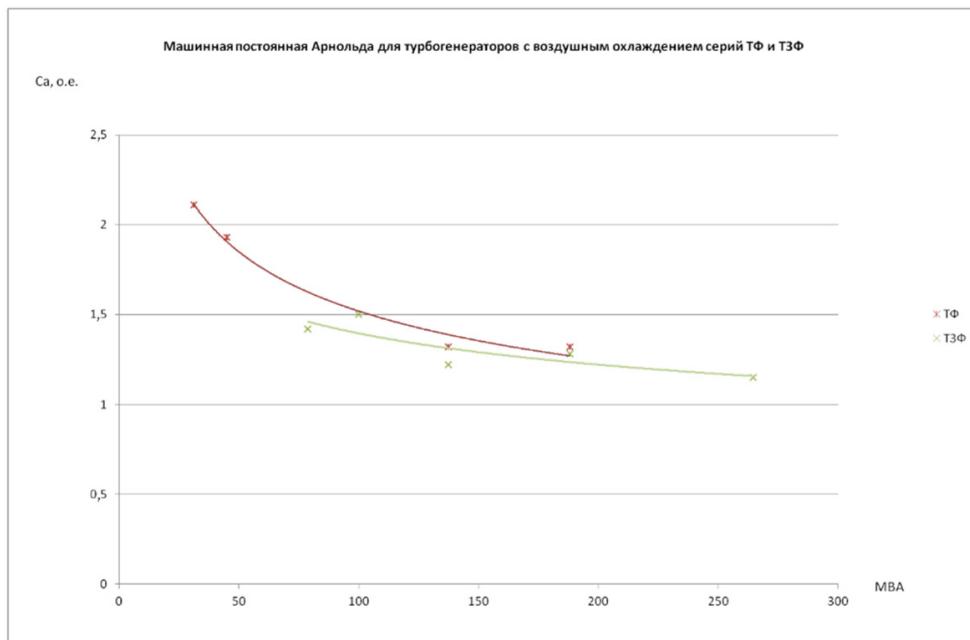


Рис. 10. Машинная постоянная Арнольда для турбогенераторов с воздушным охлаждением серий ТФ и ТЗФ

Fig. 10. Arnold's machine constant for air-cooled turbogenerators of the TF and T3F series

определяется, при прочих равных, в том числе и меньшим удельным расходом воздуха, потребным для охлаждения сердечника статора единичной активной мощности (рис. 9);

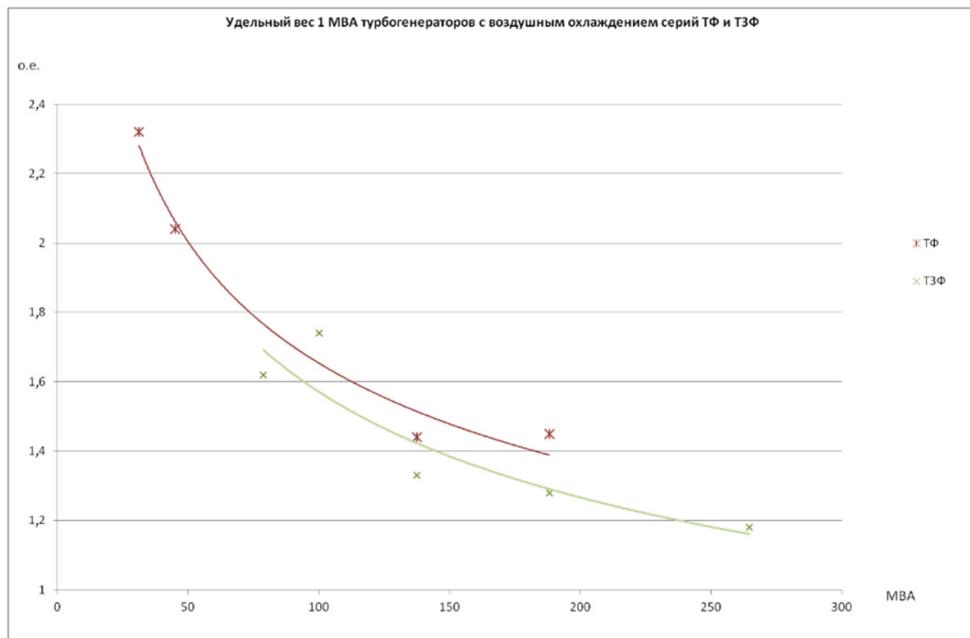


Рис. 11. Удельный вес 1 МВА турбогенераторов с воздушным охлаждением серий ТФ и ТЗФ

Fig. 11. The specific mass of 1 MVA of air-cooled turbogenerators of the TF and T3F series

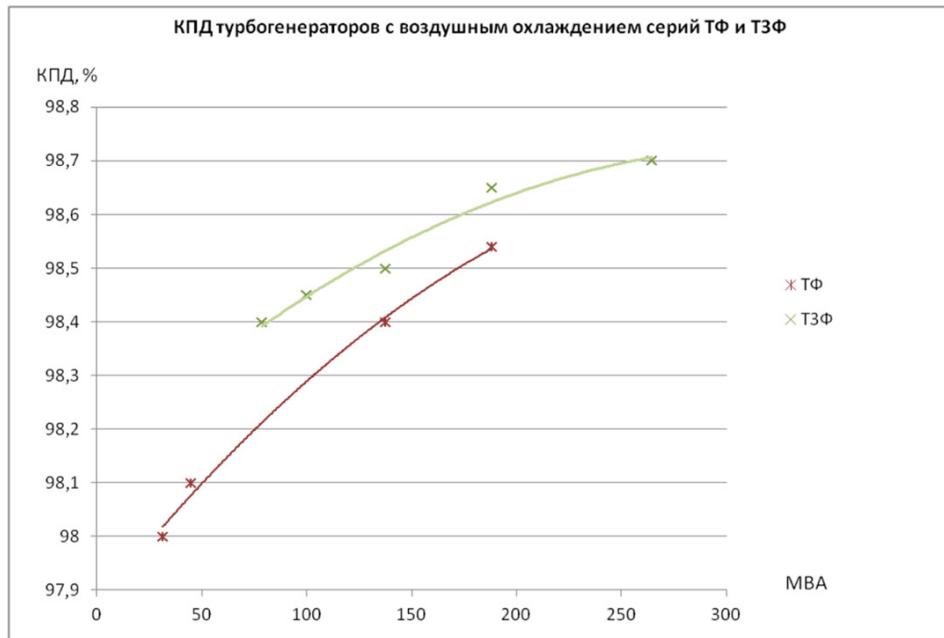


Рис. 12. Коэффициент полезного действия турбогенераторов с воздушным охлаждением серий ТФ и ТЗФ

Fig. 12. Efficiency of air-cooled turbogenerators of the TF and T3F series

- существенный эффект в снижение вентиляционных потерь с сохранением исходного теплового состояния вносит совместное введение ВНА и ННА в контур охлаждения ротора схемы ТЗФ (рис. 6, 7). В качестве примера можно привести данные результатов испытаний турбогенератора ТЗФ-160, где впервые была отработана конструкция с установкой ННА. Испытания подтвердили снижение вентиляционных потерь в контуре ротора порядка 100 кВт, что в переводе



на номинальную мощность турбогенератора 160 МВт обеспечило прирост КПД на 0,063%, что является существенным достижением (борьба за КПД изначально весьма эффективных мощных турбогенераторов идет обычно во втором знаке после запятой).

### **Заключение**

В настоящей работе представлена оценка эффективности систем воздушного охлаждения турбогенераторов, применяемых в практике мирового турбогенераторостроения: нагнетательной многоструйной и вытяжной с независимыми контурами охлаждения ротора и статора.

1. Наиболее эффективной схемой вентиляции, способной обеспечить существенное снижение вентиляционных потерь, является именно вытяжная схема вентиляции с независимыми контурами охлаждения ротора и статора, оснащенная неподвижным направляющим аппаратом при входе в ротор.

2. Снижение затрат мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха через вентиляционные каналы ротора на 20–30% без повышения температуры обмотки ротора достигается за счет установки неподвижного направляющего аппарата на участке подачи воздуха в ротор, обеспечивающего оптимальную начальную закрутку потока воздуха.

3. Эффективность охлаждения обмотки статора определяется интенсивностью охлаждения зубцовой зоны сердечника статора.

4. В нагнетательной многоструйной схеме вентиляции воздух, поступающий из воздушного зазора, не способен обеспечить эффективное охлаждение обмотки и стали сердечника в горячих отсеках. Поэтому снижение температуры зубцовой зоны в данной схеме охлаждения может быть обеспечено только за счет повышения расхода воздуха и дополнительного охлаждения воздуха, поступающего в холодные зоны, что приводит к значительному усложнению конструкции генератора.

5. Сравнение турбогенераторов с рассмотренными схемами вентиляции по технико-экономическим критериям позволяет судить о неоспоримых преимуществах вытяжной схемы вентиляции с независимыми контурами охлаждения статора и ротора.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

[1] Манинов Э.Р., Коновалов А.В., Костельов А.М., Филин А.Г. Особенности систем охлаждения и возможности повышения эффективности теплопередачи в обмотках статоров турбогенераторов с косвенным охлаждением // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 7. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2024-17-7-5-15>

[2] Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г. Повышение интенсивности охлаждения роторов турбогенераторов с газовым охлаждением // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли 2021. 2021. С. 189–193.

[3] Korovkin N., Verkhovtsev D., Gulay S. Rotor Air-Cooling Efficiency of Powerful Turbogenerator, IEEE Transactions on Energy Conversion, 36 (3) (2021) 1983–1990. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3045063>

[4] Korovkin N., Verkhovtsev D., Gulay S., Maiantcev M., Liamin A. Analysis of the Temperature Non-Uniformity of the Rotor Winding of a Powerful Air-Cooled Turbogenerator, 2021 3<sup>rd</sup> International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), (2021) 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388064>

[5] Zhou G.-H., Han L., Fan Z.-N., Zhang H.-B., Dong X.-C., Wang J. Ventilation Cooling Design for a Novel 350-MW Air-Cooled Turbo Generator, IEEE Access, 6 (2018) 62184–62192. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875757>

- [6] Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., Железняк В.Н. Повышение эксплуатационной надёжности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>
- [7] Iseli M., Zimmerli B., Mayor K., Verrier M., Sabater Y. Air-cooled turbogenerator series for a changing market, eCIGRE Session materials, (2002).
- [8] Wen H., Shi Y., Wu L., Du Y., Fang Y. Improving Combined Flow and Thermal Network Accuracy for Radially Air-Cooled Generators by Considering the Nonlinear Resistance Characteristics of T-Junction Flow, IEEE Transactions on Industry Applications, 58 (3) 2022 3394–3404. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3148213>
- [9] Liu W., Wang S., Zhang J., Li D., Li W., Xu G. Numerical Calculation of Fluid Heat Transfer in Rotor of Large Air-Cooled Generator Based on Global Ventilation Network Model, IEEE Transactions on Industry Applications, 60 (6) (2024) 8776–8784. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3457872>
- [10] Li R., Cheng P., Lan H., Li W., Gerada D., Hong Y. Stator Non-Uniform Radial Ventilation Design Methodology for a 15 MW Turbo-Synchronous Generator Based on Single Ventilation Duct Subsystem, Energies, 14 (10) (2021) 2760. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102760>
- [11] Fujita M., Kabata Y., Tokumasu T., Kakiuchi M., Shiomi H., Nagano S. Air-cooled large turbine generator with multiple-pitched ventilation ducts, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, (2005) 910–917. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195830>
- [12] Xu G., Wang Y., Li Z., Xiao Y. Stator temperature rise of synchronous condenser affected by temperature variation at rotor airflow outlet, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 169 (2025) 110772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110772>
- [13] Hess S., Joho R., von Wolfersdorf J., Zimmermann H. Turbo-generator, US Patent, No. 6097116 (1998).
- [14] Kahati Y., Osawa T. Rotor of dynamo-electric machine, JP Patent, No. 10285853 (1998).
- [15] Афанасов П.А., Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г. Ротор электрической машины. Пат. RU 2691644 РФ, Н 02 К 1/32; заявитель и патентообладатель ПАО «Силовые машины», опубл. 17.06.2019, Бюл. № 17, 24 с.: 8 ил.
- [16] Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г. Современные подходы к разработке системы охлаждения турбогенераторов с воздушным охлаждением // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 38–54. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30101>
- [17] Tartaglione V. Ventilated rotor of high-power turbogenerator for production of electricity, US Patent, No. 8040002 (2011).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КАРТАШОВА Татьяна Николаевна** – начальник сектора, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: Kartashova\_TN@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0305-1340>

**ПРОКОФЬЕВ Алексей Юрьевич** – главный специалист, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: Prokofev\_AY@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8931-5976>

**ФИЛИН Алексей Григорьевич** – главный специалист, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: a.g.filin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9516-9970>



**ГРИШИН Николай Васильевич** – заместитель главного конструктора, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.  
E-mail: kostroma44@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1487-0329>

## REFERENCES

- [1] E.R. Mannanov, A.V. Konovalov, A.M. Kostelov, A.G. Filin, Features of Cooling Systems and Possibilities of Increased Heat Transfer Efficiency in Stator Windings of Indirect-Cooled Turbogenerators, LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science, 17 (7) (2024) 5–15. DOI: <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2024-17-7-5-15>.
- [2] T.N. Kartashova, A.Yu. Prokof'ev, A.G. Filin, Povyshenie intensivnosti okhlazhdennia rotorov turbogeneratorov s gazovym okhlazhdenniem [Increasing the cooling intensity of gas-cooled turbogenerator rotors], Sbornik rabot laureatov mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tehnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye toplivno-energeticheskoi i dobyvayushchei otrassli 2021 [Sbornik works as laureates of the international competition for scientific, scientific-technical and innovative developments aimed at the development of the fuel-energy and other industries 2021], (2021) 189–193.
- [3] N. Korovkin, D. Verkhovtsev, S. Gulay, Rotor Air-Cooling Efficiency of Powerful Turbogenerator, IEEE Transactions on Energy Conversion, 36 (3) (2021) 1983–1990. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3045063>
- [4] N. Korovkin, D. Verkhovtsev, S. Gulay, M. Maiantcev, A. Liamin, Analysis of the Temperature Non-Uniformity of the Rotor Winding of a Powerful Air-Cooled Turbogenerator, 2021 3<sup>rd</sup> International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), (2021) 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388064>
- [5] G.-H. Zhou, L. Han, Z.-N. Fan, H.-B. Zhang, X.-C. Dong, J. Wang, Ventilation Cooling Design for a Novel 350-MW Air-Cooled Turbo Generator, IEEE Access, 6 (2018) 62184–62192. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875757>
- [6] E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.G. Filin, V.N. Zheleznyak, Improvement of operational reliability of air-cooled turbogenerators for a gas turbine plant, Global Energy, 29 (03) (2023) 74–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>
- [7] M. Iseli, B. Zimmerli, K. Mayor, M. Verrier, Y. Sabater, Air-cooled turbogenerator series for a changing market, eCIGRE Session materials, (2002).
- [8] H. Wen, Y. Shi, L. Wu, Y. Du, Y. Fang, Improving Combined Flow and Thermal Network Accuracy for Radially Air-Cooled Generators by Considering the Nonlinear Resistance Characteristics of T-Junction Flow, IEEE Transactions on Industry Applications, 58 (3) 2022 3394–3404. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3148213>
- [9] W. Liu, S. Wang, J. Zhang, D. Li, W. Li, G. Xu, Numerical Calculation of Fluid Heat Transfer in Rotor of Large Air-Cooled Generator Based on Global Ventilation Network Model, IEEE Transactions on Industry Applications, 60 (6) (2024) 8776–8784. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2024.3457872>
- [10] R. Li, P. Cheng, H. Lan, W. Li, D. Gerada, Y. Hong, Stator Non-Uniform Radial Ventilation Design Methodology for a 15 MW Turbo-Synchronous Generator Based on Single Ventilation Duct Subsystem, Energies, 14 (10) (2021) 2760. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102760>
- [11] M. Fujita, Y. Kabata, T. Tokumasu, M. Kakiuchi, H. Shiomi, S. Nagano, Air-cooled large turbine generator with multiple-pitched ventilation ducts, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, (2005) 910–917. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2005.195830>
- [12] G. Xu, Y. Wang, Z. Li, Y. Xiao, Stator temperature rise of synchronous condenser affected by temperature variation at rotor airflow outlet, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 169 (2025) 110772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110772>

- [13] S. Hess, R. Joho, J. von Wolfersdorf, H. Zimmermann<sup>t</sup>, Turbo-generator, US Patent, No. 6097116 (1998).
- [14] Y. Kahati, T. Osawa, Rotor of dynamo-electric machine, JP Patent, No. 10285853 (1998).
- [15] P.A. Afanasov, T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofev, A.G. Filin, Electric Machine Rotor, RU Patent, No. 2691644 (2019).
- [16] T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofev, A.G. Filin, Modern approaches to cooling system design for air-cooled turbogenerators, Global Energy, 30 (01) (2024) 38–54, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30101>
- [17] V. Tartaglione, Ventilated rotor of high-power turbogenerator for production of electricity, US Patent, No. 8040002 (2011).

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Tatyana N. KARTASHOVA – JSC “Power machines”.**  
E-mail: Kartashova\_TN@power-m.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0305-1340>

**Aleksei Yu. PROKOFEV – JSC “Power machines”.**  
E-mail: Prokofev\_AY@power-m.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8931-5976>

**Aleksei G. FILIN – JSC “Power machines”.**  
E-mail: a.g.filin@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9516-9970>

**Nikolay V. GRISHIN – JSC “Power machines”.**  
E-mail: kostroma44@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1487-0329>

**Поступила: 06.05.2025; Одобрена: 16.07.2025; Принята: 18.07.2025.**  
**Submitted: 06.05.2025; Approved: 16.07.2025; Accepted: 18.07.2025.**

# Металлургия. Материаловедение

## Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 541.136

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31303>



П.А. Новиков<sup>✉</sup>, Г.В. Цветкова, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> novikov\_pa@spbstu.ru

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ДОБАВОК В ЛИТИЙ-ИОННЫХ БАТАРЕЯХ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВЫСОКОМОЩНЫХ УСТРОЙСТВАХ

**Аннотация.** В данной работе проведено сравнительное исследование эффективности различных проводящих добавок в катодных электродах литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) на основе коммерческого материала  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  (NCM523). В качестве проводящих компонентов были изучены: технический углерод Super P, полимер PEDOT:PSS и углеродные нанотрубки (УН). Исследование включало оценку морфологии электродов, зарядно-разрядных характеристик, циклической стабильности, импедансной спектроскопии и циклической вольтамперометрии. В ходе анализа полученных результатов было выяснено, что добавки УН обеспечивают наилучшие электрохимические параметры, включая минимальную поляризацию, высокую удельную емкость и стабильность при высоких токах. Добавка PEDOT:PSS продемонстрировала характеристики, потенциально интересные для применения в высокомощных ЛИА, но подготовка образцов требует оптимизации условий приготовления.

**Ключевые слова:** литий-ионные аккумуляторы, токопроводящие добавки, высокомощные аккумуляторы, катодные материалы.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Соглашение № 075-15-2025-210 от 04.04.2025).

**Для цитирования:**

Новиков П.А., Цветкова Г.В., Попович А.А. Оценка эффективности различных проводящих добавок в литий-ионных батареях для применения в высокомощных устройствах // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31303>



P.A. Novikov  , G.V. Tsvetkova, A.A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

 novikov\_pa@spbstu.ru

## EFFECTIVENESS EVALUATION OF VARIOUS CONDUCTIVE ADDITIVES IN LITHIUM-ION BATTERIES FOR USE IN HIGH-POWER DEVICES

*Abstract.* This work presents a comparative study of the effectiveness of various conductive additives in cathode electrodes of lithium-ion batteries based on the commercial  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  (NCM523) material. The following conductive components were studied: Super P carbon black, polymer PEDOT:PSS and carbon nanotubes (CNTs). The study involved the evaluation of electrode morphology, charge-discharge characteristics, cyclic stability, impedance spectroscopy and cyclic voltammetry. Analysis of the obtained results revealed that the CNT additives provide the best electrochemical parameters, including minimal polarization, high specific capacitance and stability at high currents. PEDOT:PSS additive demonstrated characteristics that are potentially promising for application in high-power lithium-ion batteries, but the sample preparation process requires optimization of the synthesis conditions.

*Keywords:* lithium-ion batteries, conductive additives, high-power batteries, cathode materials.

*Acknowledgements:* The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the strategic academic leadership program “Priority 2030” (Agreement No. 075-15-2025-210 dated 04.04.2025).

*Citation:*

Novikov P.A., Tsvetkova G.V., Popovich A.A., Effectiveness evaluation of various conductive additives in lithium-ion batteries for use in high-power devices, Global Energy, 31 (03) (2025) 45–59, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31303>

**Введение.** Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) за несколько десятилетий своего развития стали неотъемлемой частью современной жизни. Их появление дало мощный толчок к технологическому прогрессу в области мобильной электроники и электротранспорта, сыграв ключевую роль в переходе от машин, работающих на топливе, к экологичным электромобилям.

Несмотря на то, что история ЛИА насчитывает уже около 50 лет, потенциал многих катодных материалов до сих пор не реализован в полной мере. Однако постоянное совершенствование технологий и разработка новых материалов открывают новые горизонты для улучшения характеристик аккумуляторов. В первую очередь потребителей интересуют такие параметры, как удельная мощность и энергоемкость, которые напрямую зависят от конструкции батарей.

Для повышения эффективности аккумуляторов на литий-ионной системе на сегодняшний день были предприняты такие разработки, как создание принципиально новых активных материалов, включая обогащенные литием соединения, такие как силикат железа-лития и оксид ванадия, а также создание альтернативных натрий- и калий-ионных аккумуляторов следующего поколения [1–8]. Помимо этого были предприняты попытки по улучшению уже широко используемых компонентов, внедрение передовых методик [9, 10], а также работа над повышением эффективности вспомогательных элементов, таких как электролиты [11], токосъемники [12], сепараторы и проводящие добавки [13–15].



Современные исследования в области ЛИА сосредоточены на поиске способов повышения их эффективности, и в этом направлении выделяются два ключевых подхода.

Один из них связан с использованием аддитивных технологий, которые позволяют совершенствовать конструкцию аккумуляторов, сокращая количество вспомогательных элементов, снижающих удельную энергию [16, 17]. Другой подход направлен на изменение структуры электродов, а именно – на увеличение их толщины. Хотя этот метод способствует снижению затрат и повышению энергетической плотности, он также приводит к значительному падению удельной мощности аккумулятора [18–21].

Еще один вариант повышения эффективности ЛИА – оптимизация состава электродов путем уменьшения доли связующих веществ и проводящих добавок [22]. Такой подход позволяет увеличить удельную энергию батарей, не ухудшая их ключевых характеристик. В стандартных катодных суспензиях аккумуляторов обычно содержатся три компонента: активный материал (60–95%), связующее вещество (2–25%) и проводящие добавки (3–30%). Для высокомощных аккумуляторов наиболее распространенным является соотношение 80%:10%:10% [23]. Исследования показывают, что наилучшие результаты достигаются при содержании активного материала на уровне 90%, а связующего вещества и проводящих добавок – в диапазоне от 2% до 8% [24]. Однако точное соотношение компонентов зависит от конкретного типа аккумулятора и условий его эксплуатации.

В настоящее время ученые активно изучают новые проводящие добавки, такие как углеродные нанотрубки (УН), графен и электропроводные полимеры [25–28]. Эти материалы позволяют повысить содержание активного компонента в составе электрода без ухудшения его проводящих свойств. Однако, поскольку в разных исследованиях используются различные катодные материалы, рабочие напряжения и соотношения компонентов, сложно однозначно определить, какие добавки являются наиболее эффективными.

В данной работе рассматривается эффективность различных функциональных добавок в составе катодной суспензии, основанной на коммерчески доступном активном материале  $\text{LiNi}_{0,5}\text{Co}_{0,2}\text{Mn}_{0,3}\text{O}_2$ . В качестве проводящих компонентов исследуются органический полимер PEDOT:PSS (поли(3,4-этилендиокситиофен)-поли(стиролсульфонат)) и УН. Их свойства сравниваются с традиционной проводящей добавкой – нанодисперсным техническим углеродом (carbon black).

Полимер PEDOT:PSS представляет собой проводящий материал р-типа, который отличается хорошей электропроводностью, стабильностью и высокой электрохимической активностью в широком диапазоне рабочих потенциалов. Он уже используется в производстве электропроводных покрытий и становится объектом лабораторных исследований в сфере ЛИА. УН, обладая выдающимися механическими, химическими и электрическими свойствами, широко применяются в создании различных электронных устройств.

### Материалы и методы

В настоящем исследовании в качестве активного материала положительного электрода был выбран литий-никель-кобальт-марганцевый оксид с мольным соотношением переходных металлов 5:2:3 (NCM523), широко применяемый в ЛИА. Электролит представляет собой 1М раствор соли гексафторфосфата лития, растворенный в равных объемных долях этиленкарбоната, диметилкарбоната и диэтилкарбоната. Все реагенты и материалы, включая компоненты электролита, приобретались у отечественных производителей.

Целью данной работы стало сравнение эффективности трех типов электропроводящих добавок в катодных смесях: проводящего полимерного связующего PEDOT:PSS, традиционно используемой углеродной токопроводящей добавки наполнителя Super P, а также УН. Составы катодных смесей и массовые доли компонентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Составы образцов катодных смесей

Table 1

## Compositions of samples of cathode mixtures

Образец	Массовая доля NCM, %	Массовая доля токопроводящей добавки, %	Массовая доля PVDF, %	Массовая доля др. компонентов, %
PEDOT:PSS	92	2% PEDOT + 4% Super P	—	2% карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ)
Super P <sub>(н)</sub>	91	4 % Super P	5	—
Super P <sub>(в)</sub>	80	10 % Super P	10	—
УН <sub>(н)</sub>	91	1% УН + 3% Super P	5	—
УН <sub>(в)</sub>	76	4% УН	20	—

Приготовление катодных суспензий производилось в агатовой ступке непрерывным перемешиванием в течение 15 минут. В качестве растворителя для связующего PVDF использовался Н-метилпирролидон. Полученные суспензии наносились на алюминиевую фольгу, выступающую в роли токоснимателя, и затем сушились при температуре 95°C в течение 24 часов в вакуумной сушильной камере.

Электрохимические характеристики материалов исследовались с использованием испытательных макетов типа CR2032. В качестве противоэлектрода использовалась литиевая фольга диаметром 16 мм, сепаратором служила полипропиленовая мембрана Celgard. Сборка элементов производилась в инертной атмосфере аргона в перчаточном боксе.

Гальваностатические циклы заряда-разряда выполнялись с использованием оборудования Neware BTS CT-3008-5V10mA в диапазоне напряжений 2,7–4,2 В (относительно Li/Li<sup>+</sup>) при плотностях тока от 0,1 до 10 С. Импедансные спектры снимались с помощью установок Parstat 4000+ и Solartron 1280 в диапазоне частот 100 кГц – 0,02 Гц при амплитуде 5 мВ. Циклическая вольтамперометрия проводилась со скоростью сканирования 20–50 мкВ/с в потенциале от 3 до 4,2 В. Морфология электродов анализировалась с использованием сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Merlin.

## Результаты и обсуждение

Морфология исходного катодного материала без токопроводящих добавок, а также образцов УН<sub>(в)</sub>, PEDOT:PSS и Super P<sub>(н)</sub> была проанализирована методом сканирующей электронной микроскопии. Микрофотографии продемонстрированы на рис. 1. Исходный порошок NCM523 демонстрирует относительно однородную морфологию частиц сферической и полисфериодальной формы с хорошо выраженной гранулярной структурой. Частицы имеют размеры порядка нескольких микрон с плотной поверхностью и четко очерченными границами. Такая морфология указывает на минимальную агрегацию и хорошую первичную дисперсность. Образец с добавлением Super P (рис. 1а) показывает формирование более разветвленной и неоднородной структуры. Поверхность частиц становится менее четкой, наблюдается значительное количество мелкодисперсного материала на фоне, что свидетельствует о покрытии активных частиц углеродным наноматериалом. Такая структура способствует улучшению электронной проводимости за счет образования проводящей сетки. Поверхность образца, модифицированного проводящим полимером PEDOT:PSS, приобретает более гладкий и слоистый вид. Хорошо

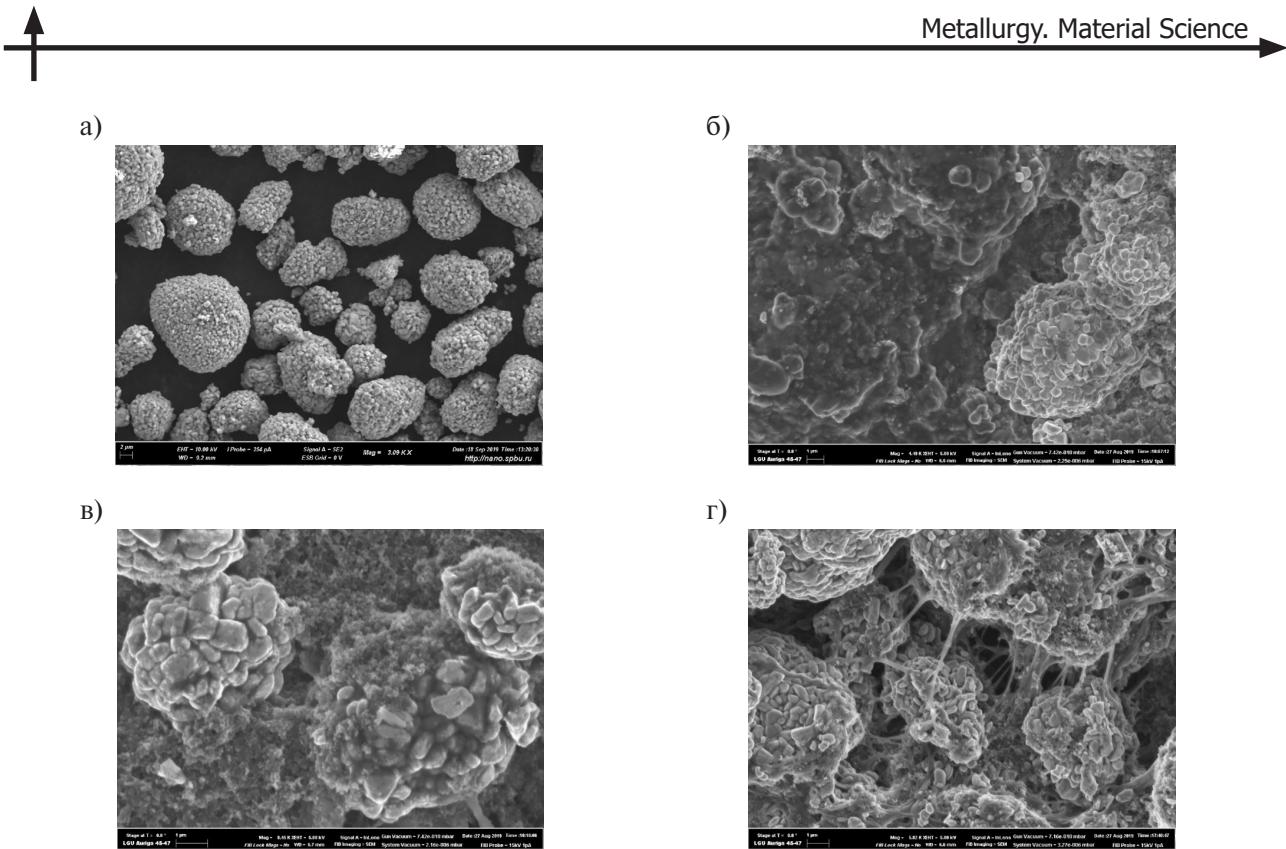


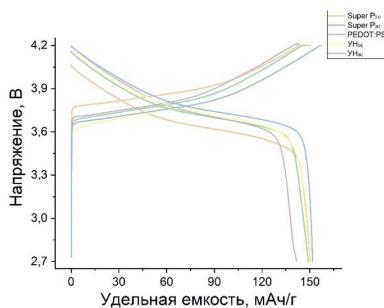
Рис. 1. СЭМ-изображения исходного порошка NCM523 (а), образца с добавкой Super P(в) (б), образца PEDOT:PSS (в), образца с низким содержанием УН (г)

Fig. 1. SEM images of initial NCM523 powder (a), sample with Super P(h) additive (b), PEDOT:PSS sample (c) and sample with CNT(l) (d)

заметны скопления чешуйчатых агрегатов, обволакивающих первичные частицы. Подобная морфология указывает на равномерное распределение полимерной фазы, что может улучшить механическую стабильность и электронную проводимость при циклировании. Образец с низким содержанием углеродного наноматериала УН<sub>(н)</sub> характеризуется выраженной пористостью и наличием развитой сети волокнистых структур. Наблюдается слабая агломерация углеродных волокон и частиц активного материала. Такая морфология может указывать на неравномерное распределение компонентов в электроде, что потенциально снижает эффективность транспорта электронов и ионов.

Зарядно-разрядные кривые всех образцов на 5-м цикле в диапазоне напряжений от 2,7 до 4,2 В при скорости 0,2C продемонстрированы на рис. 2а. Удельная разрядная емкость у всех образцов, кроме PEDOT, составляет около 150 мАч/г. В свою очередь, емкость при разряде у PEDOT образца меньше 0 142 мАч/г. Результаты исследования методами оптической и электронной микроскопии объясняют это явление тем, что поверхность электрода PEDOT не всегда однородна, некоторые частицы NCM могут не быть полностью покрыты связующим. Вероятно, это могло повлиять на локальное отслоение электрода либо электроизоляцию и, в свою очередь, неэффективное использование всей активной массы, что и объясняет более низкие емкостные характеристики по сравнению с остальными образцами. Образец УН<sub>(в)</sub> демонстрирует самое высокое среднеразрядное напряжение – 3,8 В, а образец Super P<sub>(н)</sub> – самое низкое – 3,67 В. Анализ зарядно-разрядных кривых двух образцов с добавками из углеродного нановолокна дал понять, что данные образцы демонстрируют наименьшие значения внутреннего омического сопротивления и чуть более высокие значения удельной разрядной емкости. На рис. 2б отображены дифференцированные графики емкости, полученные после сглаживания исходных

а)



б)

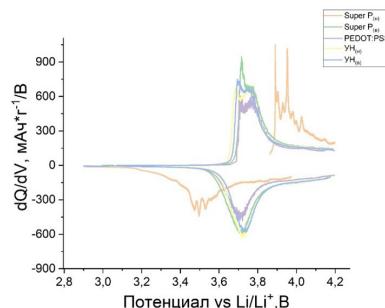


Рис. 2. Зарядно-разрядные кривые на всех образцах на 5-м цикле (а), графики дифференцированной емкости (б)

Fig. 2. Charge-discharge curves of all samples in cycle 5 (a), graphs of differentiated capacity (b)

потенциальных кривых. Становится очевидным, что пики емкости при процессах заряда и разряда у образцов PEDOT:PSS, Super P<sub>(в)</sub>, УН<sub>(в)</sub> и УН<sub>(н)</sub> расположены примерно в одинаковых областях потенциала. Зарядные пики расположены в области 3,7–3,8 В, наличие которых объясняется многофазовыми переходами Ni<sup>2+</sup>/Ni<sup>3+</sup> и Ni<sup>3+</sup>/Ni<sup>4+</sup>. Дифференцированная кривая образца Super P<sub>(н)</sub> значительно отличается от вышеописанных. Окислительный пик смещен в сторону более высоких потенциалов, а восстановительный, наоборот, в сторону более низких. Высокие значения внутреннего сопротивления как раз являются причиной такого явления, вероятно, из-за недостаточного количества токопроводящей добавки.

Были исследованы циклический ресурс при скоростях заряда/разряда 0,5 С и в диапазоне напряжений 2,7–4,2 В и стабильность при токовой нагрузке в диапазонах скоростей от 0,2 до 10 С (зарядные скорости постоянны при 0,2 С). Результаты представлены на рис. 3. При анализе результатов можно сделать вывод, что образец Super P<sub>(н)</sub> показывает наихудшие характеристики. Начальная емкость у данного образца – 131 мАч/г, после 100 циклов – 102 мАч/г, что говорит о потере 22% емкости. Также при исследовании поведения при различной токовой нагрузке Super P<sub>(н)</sub> показывает сильное падение до нулевой емкости при разряде со скоростями свыше 1 С. В свою очередь, у образца с высоким содержанием сажи результаты исследования электрохимического поведения более удачны, при циклировании в ход 100 циклов потеря емкости составила 9,5%, также стабильно поведение при испытаниях с различной токовой нагрузкой. Стоит отметить, что данный образец при скорости разряда 5 С показывает близкие емкостные характеристики к образцам PEDOT:PSS и УН<sub>(н)</sub>, УН<sub>(в)</sub>. Образец PEDOT:PSS демонстрирует циклический ресурс близкий к образцу Super P<sub>(н)</sub>, но с чуть более удачными емкостными характеристиками: 135 мАч/г против 110 мАч/г после 100 циклов с потерей емкости 18%. Циклическая стабильность данной токопроводящей добавки хуже, чем ранее рассмотренные для материалов типа LFP и LMO [28, 29], и, более того, удельные емкостные характеристики самые малые по сравнению с результатами других образцов, полученных при малых токах 0,2–0,5 С. Такое поведение, вероятно, можно объяснить тем, что добавка PEDOT:PSS используется с водным растворителем, который склонен производить OH-группы на активных частицах и приводит к дезориентации во время электрохимических испытаний. Положительное влияние токопроводящей добавки PEDOT:PSS становится очевидным при более высоких токах, когда емкостные характеристики демонстрируют 100 мАч/г при 5 С и 60 мАч/г при 10 С, по сравнению с образцом Super P<sub>(н)</sub>, который имеет схожее отношение активного материала к неактивному.

Образцы с токопроводящей добавкой УН демонстрируют наилучшие результаты. УН<sub>(н)</sub> имеет хорошую стабильность при циклировании, 143 мАч/г – начальная емкость и 125 мАч/г – после 100 циклов, потеря емкости составила 13%. Также у данного образца наивысшее значение

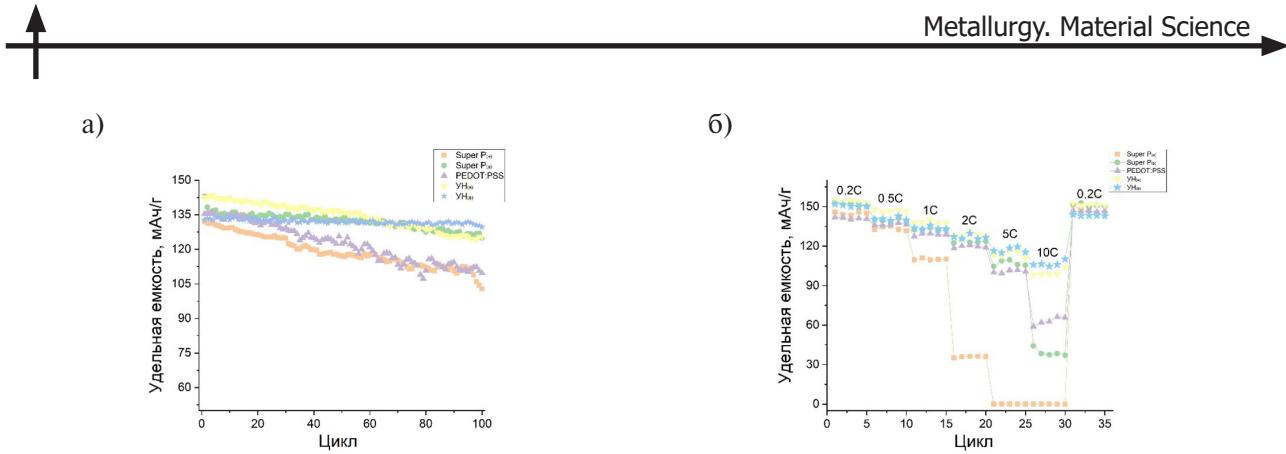


Рис. 3. Циклический ресурс образцов (а), исследование различной токовой нагрузкой (б)

Fig. 3. Cyclic life of samples (a), investigation of various current loads (b)

удельной разрядной емкости при тестировании высокими токами – 100 мАч/г при 10С. УН<sub>(в)</sub> добавка продемонстрировала начальную емкость 132 мАч/г и после 100 циклов 130 мАч/г, таким образом показав отличную стабильность и потерю емкости в 1,5%. Помимо этого, данный образец имеет наилучшие показатели при исследовании токовой нагрузкой, удельная разрядная емкость при 10 С – 105–110 мАч/г. Коллектив исследователей продемонстрировал в своей публикации [14], что катодный материал NCM523 с добавкой из УН в количестве 5 мас.% при заряде до потенциала 4,8 В может достигнуть значения удельной емкости 260 мАч/г, что является близким к теоретическому значению [30]. Другая группа авторов [31] описала работу суспензии, состоящей из NCM523 и УН без дополнительного связующего вещества, которая продемонстрировала многообещающие электрохимические характеристики. Также данная группа исследовала другой состав суспензии с УН и полиакриловой кислотой в качестве связующего, которая позволяет улучшить адгезию с токоснимателем и предотвратить расслаивание и растрескивание электрода. Но, несмотря на эти преимущества, отсутствие электронной и ионной проводимости отрицательно влияет на кинетику реакций и, следовательно, приводит к снижению удельной емкости при высоких токах. Тем не менее в наших экспериментах образцы с УН и связующим PVDF демонстрируют более стабильное поведение, что позволяет нам сделать вывод, что суспензия с PVDF в качестве связующего обладает более перспективными характеристиками.

Данные образцы были также изучены методом циклической вольтамперометрии (ЦВА), который применяется для исследования электрохимической кинетики, но в нашем случае позволил изучить поведение каждой токопроводящей добавки. Существует несколько типичных диапазонов скоростей съемки поляризационных кривых, при которых изучается различная кинетика ЛИА. ЦВА при скоростях съемки порядка 100 мВ/с позволяет изучить кинетические ограничения, такие как реакция переноса заряда и процесс переноса ионов лития через поверхностные пленки. Твердофазная диффузия ионов лития через материалы катода/анода может быть исследована средними скоростями съемки между десятыми и сотнями микровольт в секунду. Характеристики поляризационных кривых в области от единиц до десятка микровольт в секунду позволяет подробно изучить стадии интеркаляции и фазовые переходы. Измерения ЦВА с низкой скоростью сканирования могут отражать накопление лития, близкое к равновесному, не поддающееся контролю диффузии, и дать дополнительное представление о кинетике процессов интеркаляции.

В наших исследованиях были использованы скорости сканирования 20, 30, 40 и 50 мВ/с в диапазоне потенциалов от 3 до 4,2 В за исключением образца PEDOT:PSS, так как его потенциал отсечки равен 4,3 В, кривые представлены на рис. 4. Результаты данных измерений отражают

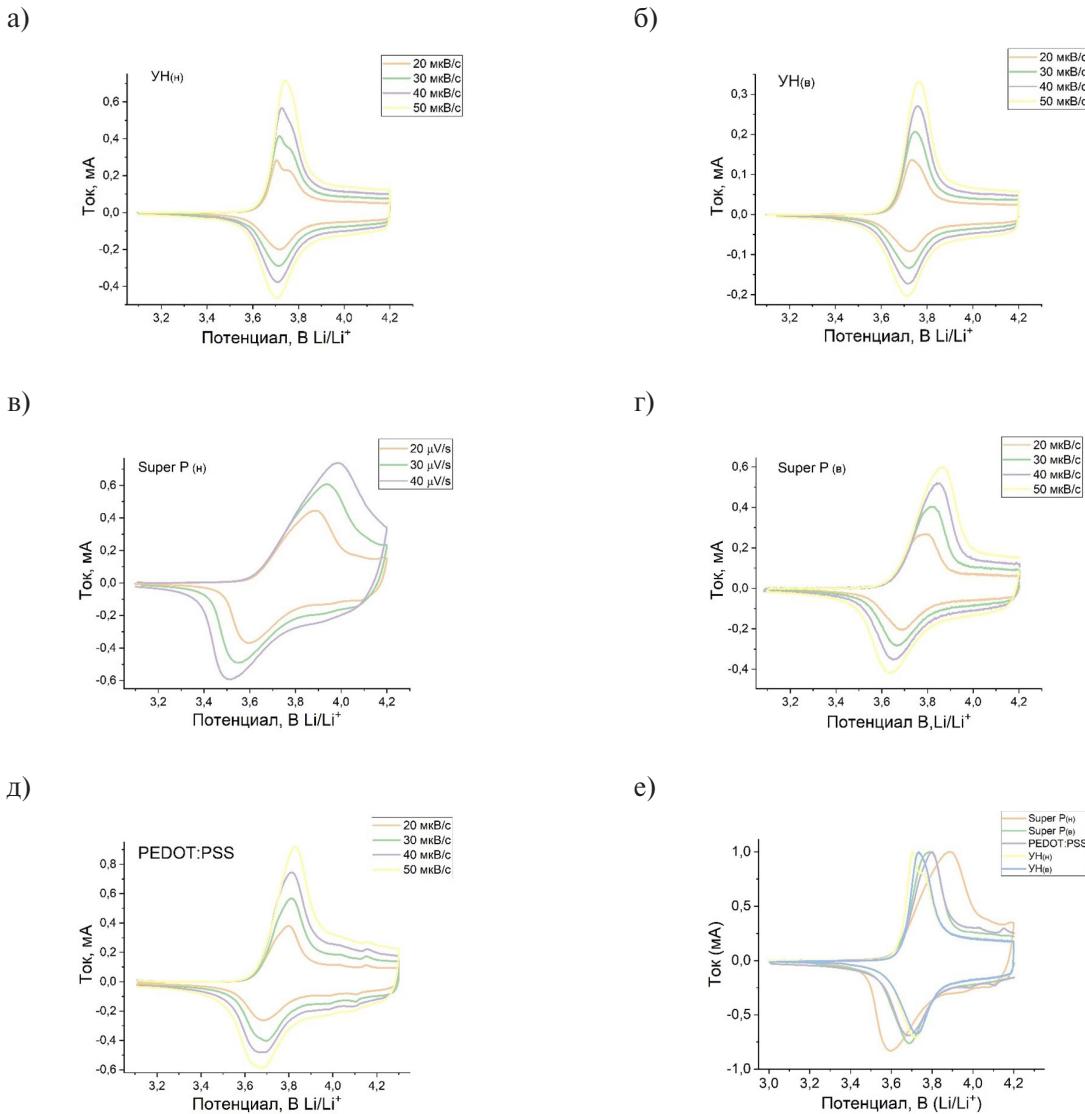


Рис. 4. Кривые ЦВА для всех образцов (а–д), сравнительный график (е)  
 Fig. 4. CV curves for all samples (a–e), comparative graph (f)

характеристики твердофазной диффузии ионов лития, стадии интеркаляции и, вероятно, фазовые переходы. Все исследованные образцы имели один основной анодный пик и катодный пик, которые ассоциируются с окислительно-восстановительными реакциями атомов никеля в тройном литированном оксиде в диапазоне напряжений от 2,7 до 4,2 В. Электрохимическое поведение подготовленных электродов может подвергнуться сравнению с использованием различия потенциалов, также известной как поляризация,  $\Delta E$  ( $E_{\text{ox}} - E_{\text{red}}$ ), между процессом изъятия и внедрения ионов лития. Оба электрода с добавкой из УН продемонстрировали наименьшие значения поляризации, около 10 мВ при скорости 20 мкВ/с, обратимость ОВР и, как следствие, наилучшую работу при различных токовых нагрузках, что было рассмотрено ранее.  $\Delta E = 53$  мВ при скорости 50 мКв/с для образцов с УН, что на 50% лучше, чем было представлено для NCM523 [14]. Образцы с добавкой PEDOT:PSS и Super P<sub>(B)</sub> показали средние значения поляризации в 100 мВ, что практически совпадает с ранее опубликованными результатами с 10% сажи в качестве токопроводящей добавки [32] и PEDOT:PSS [29]. Наибольшее значение поляризации, около 300 мВ при скорости сканирования в 20 мкВ/с, было получено для образца

Super P<sub>(h)</sub>, что подтверждает наихудшие показатели электрохимического поведения. Также был отмечен сдвиг потенциалов катодного пика на 20 мВ для образцов УН и PEDOT:PSS, на 50 мВ для Super P<sub>(b)</sub> и на 100 мВ для образца Super P<sub>(h)</sub> с увеличением скорости сканирования (табл. 2). Таким образом, можно сделать вывод, что электроды с токопроводящей добавкой из УН обладают улучшенными значениями диффузионной кинетики ионов лития и более низкими значениями поляризации электродов, что необходимо при высокомощностных применениях ЛИА.

Таблица 2  
Сравнение свойств токопроводящих добавок  
Table 2  
Comparison of properties of conductive additives

Образец	$\Delta E$ при 20 мкВ/с, мВ	Сдвиг потенциала, мВ	Коэффициент эффективной диффузии ( $10^{10}$ см <sup>2</sup> /с)
Super P <sub>(h)</sub>	292	105	4,3
Super P <sub>(b)</sub>	102	53	14
PEDOT:PSS	109	17	12
УН <sub>(h)</sub>	11	20	30
УН <sub>(b)</sub>	12	22	18

Интеркаляция лития является многостадийным процессом, который включает в себя миграцию Li<sup>+</sup> сквозь поверхностные слои, перенос заряда через интерфазу, твердотельную диффузию в активную массу и, наконец, накопление лития в основной массе. Данные процессы имеют характерные постоянные времена и могут быть изучены методом спектроскопии электрохимического импеданса. На рис. 5 представлены диаграммы Найквиста, полученные из всех образцов при трех потенциалах: 2,7 В – полностью разряженное состояние, 3,8 В – степень заряженности 50%, 4,2 В – полный заряд. Эквивалентная схема представлена на рис. 5г. Она включает в себя несколько схем RC, которые отображают миграцию ионов лития через поверхностные пленки, сопротивление переносу заряда  $R_{CT}$ , связанное с емкостью двойного слоя  $C_{DL}$ , конечный либо бесконечно длинный элемент типа Варбурга для твердотельной диффузии лития и, наконец, емкость интеркаляции. Параметры данных электрических элементов используются для сравнения и анализа поведения аккумулятора. Сопротивление переносу заряда и емкость интеркаляции являются величинами, зависимыми от потенциала во время процесса заряда/разряда.  $R_{CT}$  и  $C_{DL}$  часто ассоциируются с интерфазой между поверхностными пленками SEI (твердая электролитная интерфаза) и активными катодными и анодными материалами. Кривые импеданса, полученные в данном анализе, представляют собой один сжатый полукруг в области средних частот, которые можно отнести к сопротивлению переноса заряда. В образцах Super P<sub>(b)</sub> и Super P<sub>(h)</sub> сопротивление переносу заряда намного больше (100–200 Ом), чем в образцах с добавками PEDOT:PSS и УН в различном процентном соотношении, где данное сопротивление составляло 30–40 Ом. Это говорит о том, что высокочастотные характеристики подавлены в образцах с сажей в качестве токопроводящей добавки. Сопротивление поверхностной пленки для образца с добавкой PEDOT:PSS составило порядка 25 Ом, для УН<sub>(h)</sub> и УН<sub>(b)</sub> – 4–8 Ом. Сопротивление поверхностной пленки у образца PEDOT:PSS выше, вероятно, из-за того факта, что добавка полностью обволокла частицы NCM523, либо из-за групп О-Н на поверхности, которые способствовали появлению дополнительного сопротивления SEI. Микрофотографии

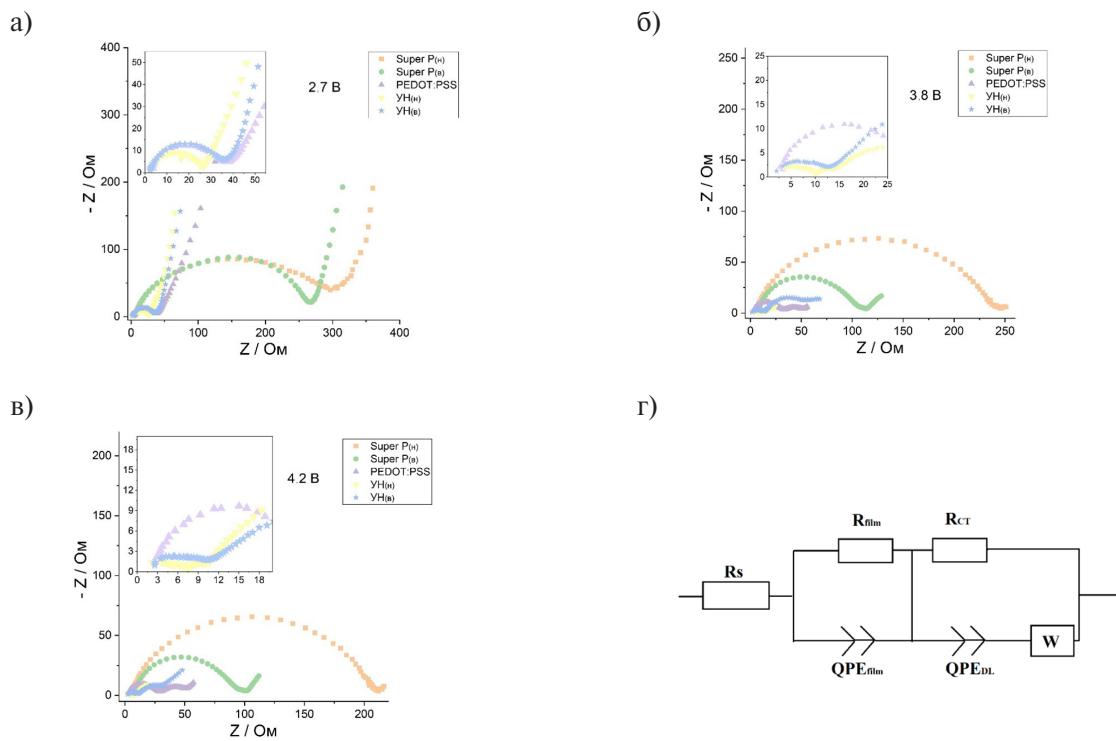


Рис. 5. Диаграммы Найквиста в разных степенях заряженности (а–в), эквивалентная схема (г)

Fig. 5. Nyquist plots in different degrees of charge (a–c), equivalent circuit (d)

образцов с сажей и УН выглядят рассыпчато и не покрывают полностью частицы NCM в сравнении с PEDOT:PSS, что, возможно, является причиной низкого сопротивления поверхности пленки. Полученные данные спектроскопии электрохимического импеданса образцов с добавками УН и PEDOT:PSS коррелируют с высоким разрядным напряжением и, соответственно, с низким внутренним сопротивлением аккумуляторов.

### Выводы

Три вида токопроводящих добавок: классическая сажа, полимерное связующее PEDOT:PSS и УН – были проанализированы и сравнены между собой в контексте влияния на электрохимическое поведение в связке с тройным литированным оксидом переходных металлов NCM523. Образцы с классической сажей продемонстрировали типичное поведение, в частности, можно сделать вывод, что  $\text{Super P}_{(h)}$  не пригоден для высокомощных применений. В свою очередь, образец  $\text{Super P}_{(e)}$  возможно применять при токах не выше 5С. Образец со связующим PEDOT:PSS не продемонстрировал заметного улучшения характеристик, но, вероятно, необходимо доработать метод приготовления электродных суспензий для улучшения электрохимии, а также не использовать водный раствор данной добавки. Образцы с УН имеют наилучшие значения емкости при токах 5 С и 10 С, анализ методом ЦВА продемонстрировал, что коэффициент эффективной диффузии у данных образцов в 2–7 раз больше. Результаты спектроскопии электрохимического импеданса показали, что значительное уменьшение сопротивления переноса заряда наблюдается у образцов с добавками PEDOT:PSS и УН. Традиционное соотношение намазки 80:10:10 для активного материала, токопроводящей добавки и связующего вещества показало классическое поведение в ЛИА, но, в целом, количество активного материала может быть вполне увеличено на 10–12% при использовании таких токопроводящих добавок, как PEDOT:PSS и УН, с соответствующим увеличением удельных емкостных характеристик. Таким образом, данным

исследованием нам удалось продемонстрировать, что использование токопроводящих добавок с УН максимально совместимо и перспективно для использования в высокомощных ЛИА без потери высоких значений удельной емкости.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Hendri Y.B., Wu Y.-S., Wu S.-H., Kuo L.-Y., Chang J.-K., Amri A., Jose R., Yang C.-C. Unlocking the synergistic effects of gradient engineering, Mg doping, and in situ Li conductive coating for high-performance Ni-rich  $\text{LiNi}_{0.92}\text{Co}_{0.04}\text{Mn}_{0.04}\text{O}_2$  cathode materials, *Journal of Materials Chemistry A*, 13 (29) (2025) 23902–23927. DOI: 10.1039/D5TA02551F
- [2] Zeng J., Shen Y., Ren X., Li X., Sun Y., Zhang G., Wu Z., Zhu S., Hai C., Zhou Y. F-doped Ni-rich layered cathode material with improved rate performance for lithium-ion batteries, *Processes*, 10 (8) (2022) 1573. DOI: 10.3390/pr10081573
- [3] Sivaraj P., Abhilash K.P., Nalini B., Selvin P.C., Goel S., Yadav S.K. Insight into cations substitution on structural and electrochemical properties of nanostructured  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  cathodes, *Journal of the American Ceramic Society*, 103 (3) (2020) 1685–1697. DOI: 10.1111/jace.16805
- [4] Wang J.N., Li Z.Q., Zhu Y.Z., Liang Y., Cui Y., Tao H.L., Song B., Nikiforov A., Zhang Z.H. Effects of doping on electronic structure and ion diffusion of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , *Journal of the American Ceramic Society*, 107 (1) (2024) 344–354. DOI: 10.1111/jace.19461
- [5] Uxa D., Holmes H.J., Meyer K., Dörrerac L., Schmidt H. Lithium tracer diffusion in  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  cathode material for lithium-ion batteries, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23 (10) (2021) 5992–5998. DOI: 10.1039/D0CP05593J
- [6] Dewan M., Majumder T., Majumder S.B. Electrophoretically deposited bismuth iron oxide as dual role anode material for both lithium and sodium-ion batteries, *Materials Today Communications*, 27 (2021) 102358. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102358
- [7] Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, 18 (5) (2015) 252–264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [8] Sun B., Mao S., Zhu S., Zhou G., Xia Y., Zhao Y. Improved rate and cycling performances of electrodes based on  $\text{BiFeO}_3$  nanoflakes by compositing with organic pectin for advanced rechargeable Na-ion batteries, *ACS Applied Nano Materials*, 1 (3) (2018) 1291–1299. DOI: 10.1021/acsanm.8b00011
- [9] Nazarov D.V., Maximov M.Yu., Novikov P.A., Popovich A.A., Silin A.O., Smirnov V.M., Bobrysheva N.P., Osmolovskaya O.M., Osmolovsky M.G., Rumyantsev A.M. Atomic layer deposition of tin oxide using tetraethyltin to produce high-capacity Li-ion batteries, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 35 (2017) 01B137. DOI: 10.1116/1.4972554
- [10] Maximov M.Yu., Novikov P.A., Nazarov D.V., Rumyantsev A.M., Silin A.O., Zhang Y., Popovich A.A. Characterization and electrochemical performance at high discharge rates of tin dioxide thin films synthesized by atomic layer deposition, *Journal of Electronic Materials*, 46 (2017) 6571–6577. DOI: 10.1007/s11664-017-5701-8
- [11] Markevich E., Salitra G., Talyosef Y., Kim U.-H., Ryu H.-H., Sun Y.-K., Aurbach D. High-performance  $\text{LiNiO}_2$  cathodes with practical loading cycled with Li metal anodes in fluoroethylene carbonate-based electrolyte solution, *ACS Applied Energy Materials*, 1 (6) (2018) 2600–2607. DOI: 10.1021/acsae.8b00304
- [12] Zhang H., Yu X., Braun P.V. Three-dimensional bicontinuous ultrafast-charge and -discharge bulk battery electrodes, *Nature Nanotechnology*, 6 (2011) 277–281. DOI: 10.1038/nnano.2011.38
- [13] Zhu H., Shen R., Tang Y., Yan X., Liu J., Song L., Fan Z., Zheng S., Chen Z. Sn-doping and  $\text{Li}_2\text{SnO}_3$  nano-coating layer co-modified  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  with improved cycle stability at 4.6 V cut-off voltage, *Nanomaterials*, 10 (5) (2020) 868. DOI: 10.3390/nano10050868

- [14] Wu Z., Han X., Zheng J., Wei Y., Qiao R., Shen F., Dai J., Hu L., Xu K., Lin Y., Yang W., Pan F. Depolarized and fully active cathode based on Li(Ni<sub>0.5</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.3</sub>)O<sub>2</sub> embedded in carbon nanotube network for advanced batteries, *Nano Letters*, 14 (8) (2014) 4700–4706. DOI: 10.1021/nl5018139
- [15] Zhou N., Wang Y., Cui H. Quasi-dynamic study of electrochemical properties of O<sub>3</sub>-high-Ni ternary single-crystal cathode materials with mirror symmetry: A first-principles study, *Nanoscale*, 15 (45) (2023) 18383–18394. DOI: 10.1039/D3NR04586B
- [16] Kolchanov D.S., Mitrofanov I., Kim A., Koshtyai Yu., Rumyantsev A., Sergeeva E., Vinogradov A., Popovich A., Maximov M. Inkjet printing of Li-rich cathode material for thin-film lithium-ion microbatteries, *Energy Technology*, 8 (3) (2020) 1901086. DOI: 10.1002/ente.201901086
- [17] Pang Y., Cao Y., Chu Y., Liu M., Snyder K., MacKenzie D., Cao C. Additive manufacturing of batteries, *Advanced Functional Materials*, 30 (1) (2020) 1906244. DOI: 10.1002/adfm.201906244
- [18] Lechner M., Kollenda A., Bendzuck K., Burmeister J.K., Mahin K., Keilhofer J., Kemmer L., Blaschke M.J., Friedl G., Daub R., Kwade A. Cost modeling for the GWh-scale production of modern lithium-ion battery cells, *Communications Engineering*, 3 (2024) 155. DOI: 10.1038/s44172-024-00306-0
- [19] Repnin A., Borisov E., Kosenko A., Pushnitsa K., Novikov P., Popovich A. The manufacture and investigation of 3D Current collectors in a lithium ion battery obtained by laser powder bed fusion, *Metals*, 14 (12) (2024) 1358. DOI: 10.3390/met14121358
- [20] Zhang Y., Kim M., Oh Y., Song H.-W., Lee S. Electrode architecture design for fast charging lithium-ion batteries: beyond material innovations, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 58 (25) (2025) 253001. DOI: 10.1088/1361-6463/added3
- [21] Oehm J., Kamlah M., Knoblauch V. Ultra-thick cathodes for high-energy lithium-ion batteries based on aluminium foams – microstructural evolution during densification and its impact on the electrochemical properties, *Batteries*, 9 (6) (2023) 303. DOI: 10.3390/batteries9060303
- [22] Kim D.S., Lee J.U., Kim S.H., Hong J.-Y. Electrochemically exfoliated graphite as a highly efficient conductive additive for an anode in lithium-ion batteries, *Battery Energy*, 2 (5) (2023) 20230012. DOI: 10.1002/bte2.20230012
- [23] Pavlovskii A., Pushnitsa K., Kosenko A., Novikov P., Popovich A. 3D-printed lithium-ion battery electrodes: A brief review of three key fabrication techniques, *Materials*, 17 (23) (2024) 5904. DOI: 10.3390/ma17235904
- [24] Lipu M.S.H., Al Mamun A., Ansari S., Miah M.S., Hasan K., Meraj S.T., Abdolrasol M.G.M., Rahman t., Maruf M.H., Sarker M.R., Aljanad A., Tan N.M.L. Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals, *Batteries*, 8 (9) (2022) 119. DOI: 10.3390/batteries8090119
- [25] Koo B.-R., Lee Y.-G., Lee S.H., An G.-H., Huang C. One-pot spray engineering to design Na<sub>0.44</sub>MnO<sub>2</sub> cathode electrodes for high-rate and cycle-stable Na-ion batteries, *Batteries*, 8 (10) (2022) 181. DOI: 10.3390/batteries8100181
- [26] Srivastava G. Graphene and its derivatives: Synthesis, applications, and environmental perspectives, *Journal of Advanced Research in Production and Industrial Engineering*, 11 (3, 4) (2024) 26–42.
- [27] Zhao H., Nie Y., Que D., Hu Y., Li Y. Improved electrochemical properties of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-based cathode material co-modified by Mg-doping and octahedral morphology, *Materials*, 12 (17). (2019) 2807. DOI: 10.3390/ma12172807
- [28] Eliseeva S.N., Apraksin R.V., Tolstopiatova E.G., Kondratiev V.V. Electrochemical impedance spectroscopy characterization of LiFePO<sub>4</sub> cathode material with carboxymethylcellulose and poly-3,4-ethylendioxythiophene/polystyrene sulfonate, *Electrochimica Acta*, 227 (2017) 357–366. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.12.157
- [29] Vorobeva K.A., Eliseeva S.N., Apraksin R.V., Kamenskii M.A., Tolstopiatova E.G., Kondratiev V.V. Improved electrochemical properties of cathode material LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> with conducting polymer binder, *Journal of Alloys and Compounds*, 766 (2018) 33–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.06.324



[30] **Jung S.-K., Gwon H., Hong J., Park K.-Y., Seo D.-H., Kim H., Hyun J., Yang W., Kang K.** Understanding the degradation mechanisms of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Advanced Energy Materials*, 4 (1) (2014) 1300787. DOI: 10.1002/aenm.201300787

[31] **Kim D., Zettsu N., Teshima K.** Three-dimensional electric micro-grid networks for high-energy-density lithium-ion battery cathodes, *Journal of Materials Chemistry A*, 5 (2017) 22797–22804. DOI: 10.1039/C7TA05042A

[32] **Xu J., Chou S.-L., Gu Q.-f., Liu H.-K., Dou S.-X.** The effect of different binders on electrochemical properties of  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 225 (2013) 172–178. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.033

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НОВИКОВ Павел Александрович** – директор НОЦ «МТиМ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: novikov\_pa@spbstu.ru

**ЦВЕТКОВА Галина Викторовна** – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: Tsvetkova\_gv@mail.ru

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** – директор ИММиТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

## REFERENCES

[1] **Y.B. Hendri, Y.-S. Wu, S.-H. Wu, L.-Y. Kuo, J.-K. Chang, A. Amri, R. Jose, C.-C. Yang**, Unlocking the synergistic effects of gradient engineering, Mg doping, and in situ Li conductive coating for high-performance Ni-rich  $\text{LiNi}_{0.92}\text{Co}_{0.04}\text{Mn}_{0.04}\text{O}_2$  cathode materials, *Journal of Materials Chemistry A*, 13 (29) (2025) 23902–23927. DOI: 10.1039/D5TA02551F

[2] **J. Zeng, Y. Shen, X. Ren, X. Li, Y. Sun, G. Zhang, Z. Wu, S. Zhu, C. Hai, Y. Zhou**, F-doped Ni-rich layered cathode material with improved rate performance for lithium-ion batteries, *Processes*, 10 (8) (2022) 1573. DOI: 10.3390/pr10081573

[3] **P. Sivaraj, K.P. Abhilash, B. Nalini, P.C. Selvin, S. Goel, S.K. Yadav**, Insight into cations substitution on structural and electrochemical properties of nanostructured  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  cathodes, *Journal of the American Ceramic Society*, 103 (3) (2020) 1685–1697. DOI: 10.1111/jace.16805

[4] **J.N. Wang, Z.Q. Li, Y.Z. Zhu, Y. Liang, Y. Cui, H.L. Tao, B. Song, A. Nikiforov, Z.H. Zhang**, Effects of doping on electronic structure and ion diffusion of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , *Journal of the American Ceramic Society*, 107 (1) (2024) 344–354. DOI: 10.1111/jace.19461

[5] **D. Uxa, H.J. Holmes, K. Meyer, L. Dörrerac, H. Schmidt**, Lithium tracer diffusion in  $\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$  cathode material for lithium-ion batteries, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23 (10) (2021) 5992–5998. DOI: 10.1039/D0CP05593J

[6] **M. Dewan, T. Majumder, S.B. Majumder**, Electrophoretically deposited bismuth iron oxide as dual role anode material for both lithium and sodium-ion batteries, *Materials Today Communications*, 27 (2021) 102358. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102358



- [7] N. Nitta, F. Wu, J.T. Lee, G. Yushin, Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, 18 (5) (2015) 252–264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [8] B. Sun, S. Mao, S. Zhu, G. Zhou, Y. Xia, Y. Zhao, Improved rate and cycling performances of electrodes based on BiFeO<sub>3</sub> nanoflakes by compositing with organic pectin for advanced rechargeable Na-ion batteries, *ACS Applied Nano Materials*, 1 (3) (2018) 1291–1299. DOI: 10.1021/acsnm.8b00011
- [9] D.V. Nazarov, M.Yu. Maximov, P.A. Novikov, A.A. Popovich, A.O. Silin, V.M. Smirnov, N.P. Bobrysheva, O.M. Osmolovskaya, M.G. Osmolovsky, A.M. Rumyantsev, Atomic layer deposition of tin oxide using tetraethyltin to produce high-capacity Li-ion batteries, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 35 (2017) 01B137. DOI: 10.1116/1.4972554
- [10] M.Yu. Maximov, P.A. Novikov, D.V. Nazarov, A.M. Rumyantsev, A.O. Silin, Y. Zhang, A.A. Popovich, Characterization and electrochemical performance at high discharge rates of tin dioxide thin films synthesized by atomic layer deposition, *Journal of Electronic Materials*, 46 (2017) 6571–6577. DOI: 10.1007/s11664-017-5701-8
- [11] E. Markevich, G. Salitra, Y. Talyosef, U.-H. Kim, H.-H. Ryu, Y.-K. Sun, D. Aurbach, High-performance LiNiO<sub>2</sub> cathodes with practical loading cycled with Li metal anodes in fluoroethylene carbonate-based electrolyte solution, *ACS Applied Energy Materials*, 1 (6) (2018) 2600–2607. DOI: 10.1021/acsaem.8b00304
- [12] H. Zhang, X. Yu, P.V. Braun, Three-dimensional bicontinuous ultrafast-charge and -discharge bulk battery electrodes, *Nature Nanotechnology*, 6 (2011) 277–281. DOI: 10.1038/nnano.2011.38
- [13] H. Zhu, R. Shen, Y. Tang, X. Yan, J. Liu, L. Song, Z. Fan, S. Zheng, Z. Chen, Sn-doping and Li<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub> nano-coating layer co-modified LiNi<sub>0.5</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.3</sub>O<sub>2</sub> with improved cycle stability at 4.6 V cut-off voltage, *Nanomaterials*, 10 (5) (2020) 868. DOI: 10.3390/nano10050868
- [14] Z. Wu, X. Han, J. Zheng, Y. Wei, R. Qiao, F. Shen, J. Dai, L. Hu, K. Xu, Y. Lin, W. Yang, F. Pan, Depolarized and fully active cathode based on Li(Ni<sub>0.5</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.3</sub>)O<sub>2</sub> embedded in carbon nanotube network for advanced batteries, *Nano Letters*, 14 (8) (2014) 4700–4706. DOI: 10.1021/nl5018139
- [15] N. Zhou, Y. Wang, H. Cui, Quasi-dynamic study of electrochemical properties of O<sub>3</sub>-high-Ni ternary single-crystal cathode materials with mirror symmetry: A first-principles study, *Nanoscale*, 15 (45) (2023) 18383–18394. DOI: 10.1039/D3NR04586B
- [16] D.S. Kolchanov, I. Mitrofanov, A. Kim, Yu. Koshtyal, A. Rumyantsev, E. Sergeeva, A. Vinogradov, A. Popovich, M. Maximov, Inkjet printing of Li-rich cathode material for thin-film lithium-ion microbatteries, *Energy Technology*, 8 (3) (2020) 1901086. DOI: 10.1002/ente.201901086
- [17] Y. Pang, Y. Cao, Y. Chu, M. Liu, K. Snyder, D. MacKenzie, C. Cao, Additive manufacturing of batteries, *Advanced Functional Materials*, 30 (1) (2020) 1906244. DOI: 10.1002/adfm.201906244
- [18] M. Lechner, A. Kollenda, K. Bendzuck, J.K. Burmeister, K. Mahin, J. Keilhofer, L. Kemmer, M.J. Blaschke, G. Friedl, R. Daub, A. Kwade, Cost modeling for the GWh-scale production of modern lithium-ion battery cells, *Communications Engineering*, 3 (2024) 155. DOI: 10.1038/s44172-024-00306-0
- [19] A. Repnin, E. Borisov, A. Kosenko, K. Pushnitsa, P. Novikov, A. Popovich, The manufacture and investigation of 3D Current collectors in a lithium ion battery obtained by laser powder bed fusion, *Metals*, 14 (12) (2024) 1358. DOI: 10.3390/met14121358
- [20] Y. Zhang, M. Kim, Y. Oh, H.-W. Song, S. Lee, Electrode architecture design for fast charging lithium-ion batteries: beyond material innovations, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 58 (25) (2025) 253001. DOI: 10.1088/1361-6463/added3
- [21] J. Oehm, M. Kamlah, V. Knoblauch, Ultra-thick cathodes for high-energy lithium-ion batteries based on aluminium foams – microstructural evolution during densification and its impact on the electrochemical properties, *Batteries*, 9 (6) (2023) 303. DOI: 10.3390/batteries9060303
- [22] D.S. Kim, J.U. Lee, S.H. Kim, J.-Y. Hong, Electrochemically exfoliated graphite as a highly efficient conductive additive for an anode in lithium-ion batteries, *Battery Energy*, 2 (5) (2023) 20230012. DOI: 10.1002/bte2.20230012

- [23] **A. Pavlovskii, K. Pushnitsa, A. Kosenko, P. Novikov, A. Popovich**, 3D-printed lithium-ion battery electrodes: A brief review of three key fabrication techniques, *Materials*, 17 (23) (2024) 5904. DOI: 10.3390/ma17235904
- [24] **M.S.H. Lipu, A. Al Mamun, S. Ansari, M.S. Miah, K. Hasan, S.T. Meraj, M.G.M. Abdolrasol, t. Rahman, M.H. Maruf, M.R. Sarker, A. Aljanad, N.M.L. Tan**, Battery management, key technologies, methods, issues, and future trends of electric vehicles: A pathway toward achieving sustainable development goals, *Batteries*, 8 (9) (2022) 119. DOI: 10.3390/batteries8090119
- [25] **B.-R. Koo, Y.-G. Lee, S.H. Lee, G.-H. An, C. Huang**, One-pot spray engineering to design  $\text{Na}_{0.44}\text{MnO}_2$  cathode electrodes for high-rate and cycle-stable Na-ion batteries, *Batteries*, 8 (10) (2022) 181. DOI: 10.3390/batteries8100181
- [26] **G. Srivastava**, Graphene and its derivatives: Synthesis, applications, and environmental perspectives, *Journal of Advanced Research in Production and Industrial Engineering*, 11 (3, 4) (2024) 26–42.
- [27] **H. Zhao, Y. Nie, D. Que, Y. Hu, Y. Li**, Improved electrochemical properties of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -based cathode material co-modified by Mg-doping and octahedral morphology, *Materials*, 12 (17). (2019) 2807. DOI: 10.3390/ma12172807
- [28] **S.N. Eliseeva, R.V. Apraksin, E.G. Tolstopiatova, V.V. Kondratiev**, Electrochemical impedance spectroscopy characterization of  $\text{LiFePO}_4$  cathode material with carboxymethylcellulose and poly-3,4-ethylendioxythiophene/polystyrene sulfonate, *Electrochimica Acta*, 227 (2017) 357–366. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.12.157
- [29] **K.A. Vorobeva, S.N. Eliseeva, R.V. Apraksin, M.A. Kamenskii, E.G. Tolstopiatova, V.V. Kondratiev**, Improved electrochemical properties of cathode material  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  with conducting polymer binder, *Journal of Alloys and Compounds*, 766 (2018) 33–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.06.324
- [30] **S.-K. Jung, H. Gwon, J. Hong, K.-Y. Park, D.-H. Seo, H. Kim, J. Hyun, W. Yang, K. Kang**, Understanding the degradation mechanisms of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Advanced Energy Materials*, 4 (1) (2014) 1300787. DOI: 10.1002/aenm.201300787
- [31] **D. Kim, N. Zettsu, K. Teshima**, Three-dimensional electric micro-grid networks for high-energy-density lithium-ion battery cathodes, *Journal of Materials Chemistry A*, 5 (2017) 22797–22804. DOI: 10.1039/C7TA05042A
- [32] **J. Xu, S.-L. Chou, Q.-f. Gu, H.-K. Liu, S.-X. Dou**, The effect of different binders on electrochemical properties of  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$  cathode material in lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 225 (2013) 172–178. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.033

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Pavel A. NOVIKOV** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: novikov\_pa@spbstu.ru

**Galina V. TSVETKOVA** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: Tsvetkova\_gv@mail.ru

**Anatoliy A. POPOVICH** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 22.07.2025; Одобрена: 25.08.2025; Принята: 29.08.2025.  
Submitted: 22.07.2025; Approved: 25.08.2025; Accepted: 29.08.2025.

Научная статья

УДК 678

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31304>



Д.В. Нечаев , Б.С. Ермаков, О.В. Швецов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

nechaev\_dv@spbstu.ru

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕАЛЬНОГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ СВАЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИТНОЙ ТРУБЫ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

**Аннотация.** В настоящей работе было рассмотрено комплексное влияние ультрафиолета (УФ), температуры и влажности на механические свойства стекло- и базальтопластиковых труб, изготовленных по технологии мокрой косослойной и перекрестной намотки соответственно. Показано, что УФ является одним из ключевых факторов, приводящих к деградации структуры полимерно-композитных материалов (ПКМ) и, как следствие, влияющих на их работоспособность в условиях Крайнего Севера в летний период. Причиной изменения механических свойств ПКМ под действием УФ-излучения, температуры и влаги является обширная эрозия, приводящая к микрорастрескиванию матрицы ПКМ с последующим образованием объемных дефектов. Установлено, что стекло- и базальтопластик имеют одинаковую стойкость к летним условиям арктического и субарктического климата, однако образцы из стеклопластика более склонны к процессу водопоглощения. Полученные регрессионные уравнения позволяют с высокой точностью прогнозировать реальный срок эксплуатации верхней части ПКМ-сваи в натурных условиях Арктики.

**Ключевые слова:** ПКМ, УФ-излучение, деградация материала, ресурс материала, климатические испытания, прогнозная модель, климатические факторы старения.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

**Для цитирования:**

Нечаев Д.В., Ермаков Б.С., Швецов О.В. Разработка метода прогнозирования реального срока эксплуатации надземной части свайной полимерной композитной трубы в летний период в условиях Крайнего Севера // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 60–73. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31304>



D.V. Nechaev , B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

nechaev\_dv@spbstu.ru

## **DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE METHOD FOR ACTUAL SERVICE LIFE ESTIMATION OF THE ABOVE-GROUND PART OF A PILE POLYMER COMPOSITE PIPE IN THE SUMMER PERIOD IN EXTREME NORTHERN CONDITIONS**

*Abstract.* In this paper, the complex effect of ultraviolet (UV) radiation, temperature and humidity on the mechanical properties of glass and basalt-plastic pipes manufactured using wet cross-layer and cross-winding technologies, respectively, was considered. It was shown that UV radiation is one of the key factors leading to degradation of the structure of polymer-composite materials (PCM) and, as a consequence, affecting their performance in extreme Northern conditions in summer period. The reason for the change in the mechanical properties of PCM under the influence of UV radiation, temperature and humidity is extensive erosion, leading to microcracking of the PCM matrix with the subsequent formation of volumetric defects. It was found that glass and basalt-plastic have the same resistance to summer conditions of the Arctic and Subarctic climates, but fiberglass samples are more prone to water absorption. The obtained regression equations make it possible to accurately predict the actual service life of the upper part of the PCM pile in natural Arctic conditions.

*Keywords:* PCM, UV radiation, material degradation, material resource, climatic tests, predictive model, climatic factors of aging.

*Acknowledgements:* The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Development of models for the degradation of service properties of metal and composite materials for construction in permafrost conditions” (FSEG-2024-0009).

*Citation:*

Nechaev D.V., Ermakov B.S., Shvetsov O.V., Development of a predictive method for actual service life estimation of the above-ground part of a pile polymer composite pipe in the summer period in extreme Northern conditions, Global Energy, 31 (03) (2025) 60–73, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31304>

**Введение.** Освоение новых нефтегазовых месторождений в отдаленных районах с особо суровыми климатическими условиями и залеганием вечной мерзлоты актуализирует проблемы по снижению капитальных затрат на этапе строительства нефтегазовой инфраструктуры [1]. Одним из способов сокращения затрат на обустройство месторождения является разработка новых решений в области фундаментостроения [2] как самого материальноемкого элемента нефтегазовой инфраструктуры [3].

Традиционным решением при проектировании и строительстве свайных фундаментов в условиях Арктики являются сваи, изготовленные из стальных труб, сваренных токами высокой частоты или под слоем флюса [4]. Однако их применение приводит к повышению капитальных затрат из-за осложненной и дорогостоящей доставки на объекты, расположенные в арктических и субарктических регионах [5]. Кроме того, суровые условия эксплуатации, связанные с особенностями мерзлых грунтов [6], низкими отрицательными температурами [7] и частыми переходами температур через 0°C [8, 9], могут привести к преждевременному выходу свайного фундамента из строя и, как следствие, к дополнительным операционным затратам [10].



Одним из способов снижения затрат и повышения надежности при обустройстве свайного фундамента является применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в качестве свайных труб, в частности из стекло- и базальтопластика [11]. Данные материалы обладают хорошим соотношением «цена–качество» и низкой плотностью, что делает их пригодными для массового применения в капитальном строительстве и снижает логистические затраты нефтегазовых компаний [12]. Однако активному внедрению свай из ПКМ препятствует отсутствие понимания деградации их структуры и изменения механических свойств под влиянием климатических факторов Крайнего Севера, вследствие чего данных для создания методик по определению реального срока их эксплуатации недостаточно [13].

Среди разнообразных климатических факторов Арктической зоны, оказывающих влияние на структуру и свойства полимерных ПКМ, важное значение, особенно в летний период, имеет комплексное воздействие солнечного ультрафиолетового (УФ) излучения, положительной температуры и относительно высокой влажности, что приводит к деградации поверхности этих материалов и снижению механических свойств [14–20]. Причиной такой ускоренной деструкции ПКМ может являться нарушение целостности поверхностного слоя под действием УФ, ведущее к деградации структуры ПКМ и появлению микротрещин за счет разрыва молекулярных цепей с последующим проникновением влаги [21]. Проникновение влаги увеличивает пластификацию, которая, в свою очередь, повышает молекулярную подвижность, что приводит к диффузии кислорода и запуску фотоокислительного процесса [21]. При этом накопленная влага в ПКМ при последующем замерзании и увеличении объема инициирует возникновение внутренних напряжений и появление новых дефектов.

Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению влияния УФ-излучения на структуру и свойства ПКМ, в них отсутствует комплексная оценка механизмов деградации ПКМ и скорость их протекания. Без такой оценки невозможно достоверно определить ресурс материала и обеспечить его надежность. Поэтому целью настоящей работы являлась качественная и количественная оценка деградации свайных труб, изготовленных из ПКМ, под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности с последующей разработкой расчетной методики прогнозирования их ресурса.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проведение климатических испытаний опытных образцов ПКМ.
2. Оценка влияния длительного воздействия УФ-излучения, повышенной температуры и влажности на механические свойства опытных образцов ПКМ.
3. Определение механизма деструкции опытных образцов ПКМ под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности.
4. Разработка прогнозной модели поведения ПКМ в летний период в условиях Крайнего Севера.

### Материал и методы исследования

Материалом исследования являлись трубы из стекло- и базальтопластика диаметром 204 и 219 мм. Труба из стеклопластика изготавливается методом мокрой косослойной намотки, а труба из базальтопластика – методом мокрой перекрестной намотки. Образцы для проведения исследования вырезались с применением станка с ЧПУ. Кондиционирование образцов осуществлялось согласно ГОСТ 12423–2013. Климатические испытания проводились в климатической камере СМ-70/100-1000 ТВХ согласно ГОСТ 9.708–83 по методу 2. Воздействие УФ-излучением осуществлялось только на одну сторону образцов с использованием ламп UVA 340.

Испытательная среда обладала следующими параметрами: воздушная атмосфера – с нормальным давлением, величина солнечной радиации составляла 86 МДж/м<sup>2</sup> в сутки, влажность и температура составляли 90% и 45°C соответственно.



Испытания на растяжение проводились по ГОСТ Р 54924–2017 с использованием испытательной машины Zwick/Roell Z100 после экспонирования в испытательной среде на протяжении 24, 48, 96, 168, 1440 часов, а для базальтопластика – дополнительно в течение 4320 часов.

Оценка деградации осуществлялась путем расчета соотношения значения соответствующих механических свойств ( $k_\sigma$ ,  $k_E$ ,  $k_\delta$ ), определенных испытанием на растяжении после экспонирования в испытательной среде и в исходном состоянии.

Исследование деградации макро- и микроструктуры проводилось в продольном и поперечном направлении с использованием стереомикроскопа Meiji Techno RZ7 и оптического микроскопа Reichert-Jung MeAF-3A соответственно.

Испытания на водопоглощение проводились согласно ГОСТ 4650–2014.

Регрессионный анализ полученных зависимостей проводили с применением ПО Excel.

Среднюю величину суммарной солнечной радиации в год на вертикальную поверхность при действительных условиях облачности брали согласно ТСН 23-334-2002 Ямalo-Ненецкого АО для городов Надыма, Нового Уренгоя и Ноябрьска. За критерий выхода из строя рассматриваемого ПКМ брали величину падения предела прочности на 10%.

### Результаты

Механические свойства образцов-свидетелей, не подвергавшихся экспонированию в испытательной среде, приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Механические свойства образцов-свидетелей из стекло- и базальтопластика**

**Table 1**  
**Mechanical properties of glass and basalt-reinforced plastic witness samples**

Материал	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Относительное удлинение, %
Стеклопластик	159±4,4	20	1,3±0,1
Базальтопластик	218,9±3,8	19,4±0,2	1,5±0,1

Из табл. 1 следует, что опытные образцы имеют схожие упругие и пластические свойства, однако предел прочности у стеклопластика ниже примерно на 35% по сравнению с базальтопластиком. Характерный внешний вид образцов после завершения каждого этапа выдержки в испытательной среде приведен на рис. 1.

Характерный вид опытных образцов после завершения каждого этапа экспонирования и проведения испытания на растяжение приведен на рис. 2.

Обобщенные результаты изменения свойств стекло- и базальтопластика после выдержки в испытательной среде на протяжении 1440 часов приведены в табл. 2.

Определено, что скорость деградации не зависит от типа материала. Результаты по оценке на водопоглощения образцов после экспонирования в испытательной среде на протяжении 1440 часов приведены в табл. 3.

Скорость изменения механических свойств образцов базальтопластика в испытательной среде приведена на рис. 3.

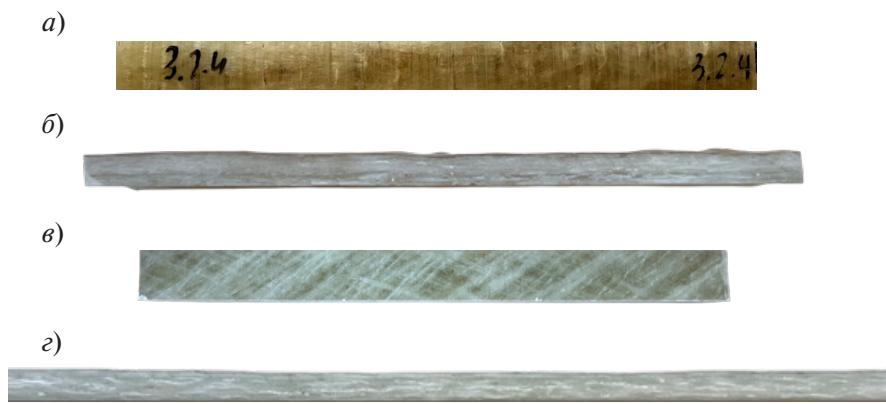


Рис. 1. Характерный внешний вид образцов из базальто- (*а–б*) и стеклопластика (*в–г*) по завершению каждого этапа выдержки в испытательной среде; вид сверху (*а, в*); вид с боку (*б, г*)

Fig. 1. Typical appearance of basalt-plastic (*a–b*) and fiberglass (*c–d*) samples upon completion of each stage of exposure in the test environment; top view (*a, v*); side view (*b, g*)

Таблица 2

**Обобщенные изменения свойств стекло- и базальтопластика  
после выдержки в испытательной среде на протяжении 1440 часов**

Table 2

**Generalized changes in the properties of glass and basalt-plastic  
after exposure to the test environment for 1440 hours**

Материал	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Относительное удлинение, %
Стеклопластик	$153 \pm 1,55 (k_{\sigma} = 0,96)$	$20 (k_E = 1)$	$1,3 \pm 0,08 (k_{\delta} = 1)$
Базальтопластик	$210,2 \pm 1,55 (k_{\sigma} = 0,96)$	$20 \pm 0,7 (k_E = 1)$	$1,4 \pm 0,05 (k_{\delta} = 0,93)$

Таблица 3

**Водопоглощение образцов в течение 1440 часов**

Table 3

**Water absorption of samples for 1440 hours**

Материал	Водопоглощение, %
Стеклопластик	0,33
Базальтопластик	0,24



Рис. 2. Характерный вид опытных образцов из базальто- (а–б) и стеклопластика (в–г) после завершения каждого этапа экспонирования и проведения испытания на растяжение; вид сверху (а, в); вид с боку (б, г)

Fig. 2. Typical appearance of basalt-plastic (a–b) and fiberglass (c–d) samples upon completion of each stage of exposure and tensile testing; top view (a, c); side view (b, d)

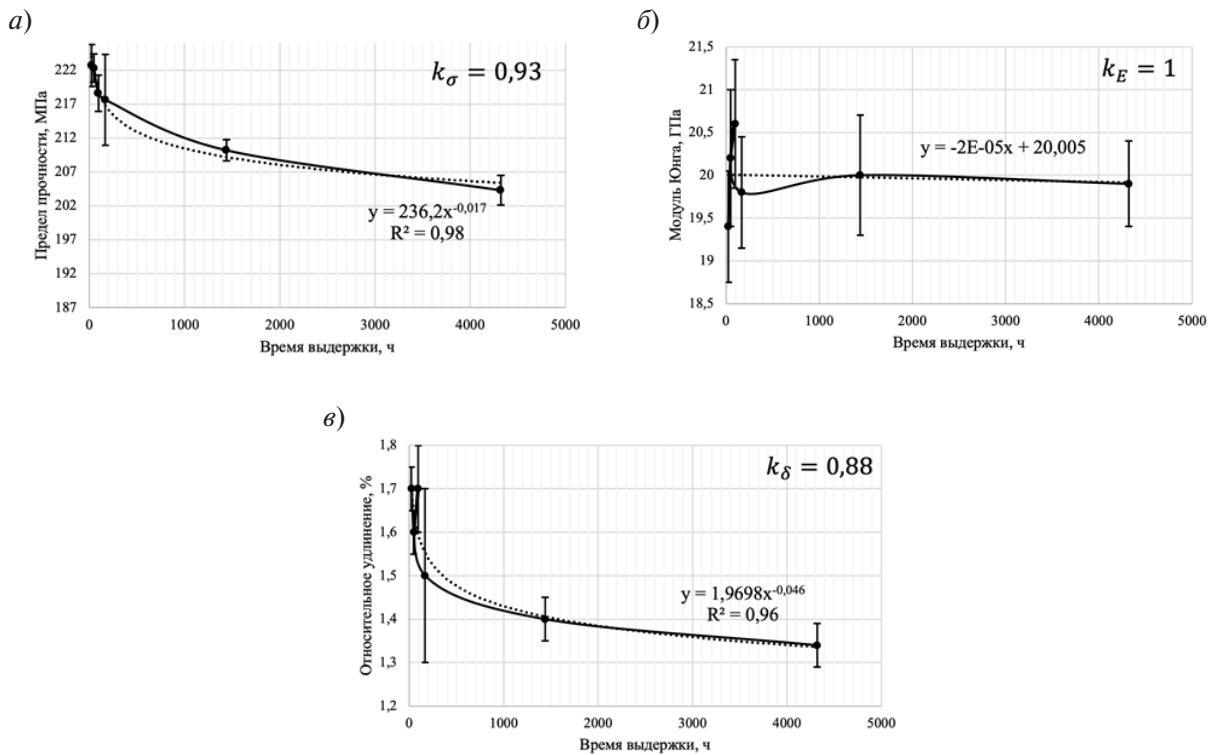


Рис. 3. Зависимость изменения значений предела прочности (а); модуля Юнга (б); относительного удлинения (в) от времени выдержки базальтопластика в испытательной среде

Fig. 3. Dependence of the change in the values of tensile strength (a); Young's modulus (b); relative elongation (c) on the time of exposure of basalt-plastic in the test environment

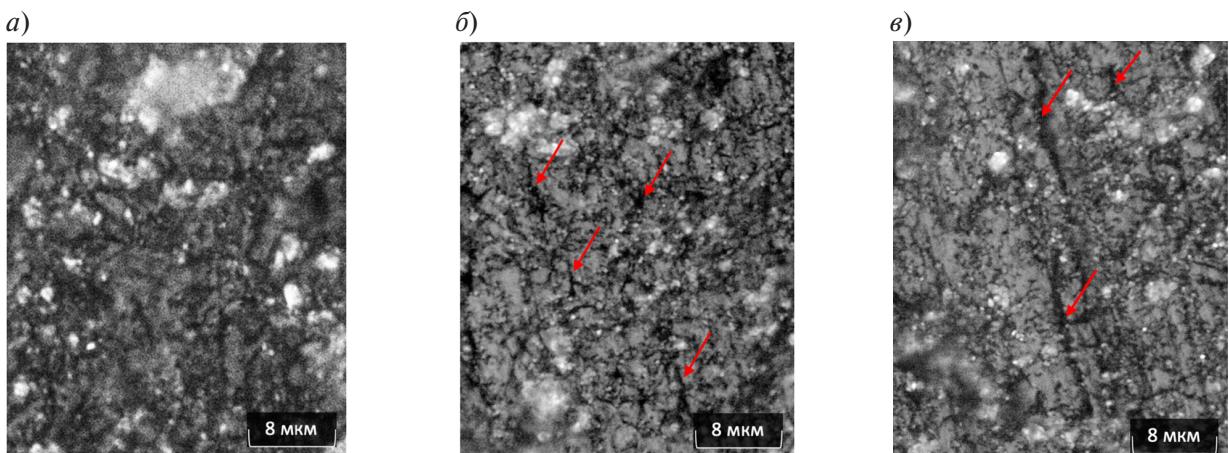


Рис. 4. Изображение структуры образца-свидетеля (а) после экспонирования на протяжении 1440 часов микротрещин (б); 4320 часов (в)

Fig. 4. Image of the structure of the witness sample (a) after exposure for 1440 hours of microcracks (b); 4320 hours (c)

На основании полученных зависимостей с целью их описания были получены эмпирические уравнения изменения предела прочности (1); модуля Юнга (2) и относительного удлинения (3):

$$y = 236,2x^{-0,017}; \quad (1)$$

$$y = -2E - 05x + 20,005; \quad (2)$$

$$y = 1,9698x^{-0,046}, \quad (3)$$

где  $y$  – величина соответствующих механических свойств базальтопластика;  $x$  – время выдержки в испытательной среде.

При этом полученные уравнения имеют высокое значение величины достоверности аппроксимации, что говорит о пригодности данных уравнений для создания прогнозных моделей.

Изображения структуры базальтопластиковых образцов в исходном состоянии и после выдержек различной протяженности приведены на рис. 4.

### Обсуждение

В результате исследования макроструктуры образцов после каждого этапа экспонирования было отмечено отсутствие дефектов типа расслоения, набухания и т.п.

Исследование изломов после завершения каждого этапа экспонирования и проведения испытания на растяжение показало отсутствие влияния времени выдержки образцов в испытательной среде на характер разрушения. При этом определено, что образцы из стеклопластика разрушаются с заметным сдвигом в межфазной зоне с последующим разрывом волокон. Также во время фрактографического анализа изломов стеклопластика обнаружены значительные пустоты, вероятно связанные с отслоением матрицы от волокна (рис. 5).

В ходе анализа полученных результатов на водопоглощение установлено, что образцы из стеклопластика склонны к большему водопоглощению. Возможной причиной увеличенной склонности образцов из стеклопластика к водопоглощению является используемая технология косослойной намотки. При таком способе волокна преимущественно расположены в одном направлении, что способствует ускоренному влагопереносу за счет капиллярного эффекта [22].

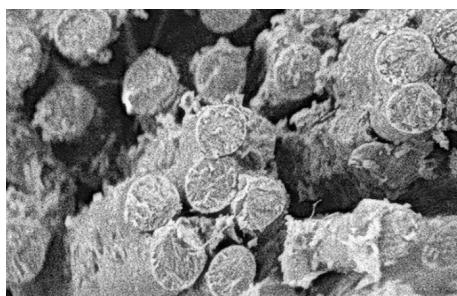


Рис. 5. Характерный излом стеклопластика после экспонирования в испытательной среде и испытания на растяжение

Fig. 5. Typical fracture of a PCM sample after exposure to a test environment and tensile testing

Таким образом, установлено, что применение опытной стеклопластиковой трубы в качестве сваи может быть ограничено в сильно обводненных и заболоченных грунтах. Поэтому дальнейшему экспонированию в испытательной среде подвергались только образцы из базальтопластика как наиболее подходящего материала для производства свайных труб, применяемых в условиях Крайнего Севера.

Анализ полученных зависимостей (рис. 4) показал отсутствие изменений механических свойств (с учетом доверительных интервалов) при малом воздействием УФ-излучения, тепла и влаги (до 168 часов). Дальнейшая выдержка образцов в испытательной среде (4320 часов) приводит к падению предела прочности (на 7%) и относительного удлинения (на 12%). Упругие свойства, с учетом доверительных интервалов, не изменились. Данные значения позволили уточнить результаты по изменению свойств базальтопластика под воздействием УФ-излучения, температуры и влаги, полученные ранее в работе [23]. При этом ГОСТ 9.708–83 позволяет проводить испытания образцов ПКМ с короткой выдержкой (до 500 часов при наличии программы испытаний), что может привести к получению недостоверных результатов по степени изменения свойств образцов ПКМ.

В ходе проведения анализа структур было определено, что причиной деградации поверхности опытных образцов является синергетический эффект эрозии, приводящий к микрорастрескиванию матрицы с последующим образованием объемных дефектов. Данные дефекты являются концентраторами напряжений, которые ускоряют рост и развитие трещин по всему сечению ПКМ при разрушении, что приводит к падению механических свойств. Данный вывод согласуется с результатами работ [24, 25]. Кроме того, изменение микроструктуры свидетельствует о процессе удаления продуктов деградации матрицы во время испытания за счет образования окисленных продуктов, меньшей молекулярной массы, из-за чего поверхность ПКМ становится доступнее для действия УФ-радиации, что облегчает и ускоряет процесс деструкции.

Также установлено, что с увеличением времени экспонирования в испытательной среде увеличиваются не только длина и ширина микротрещин, но также толщина дефектного слоя. Так, через 1440 часов выдержки опытных образцов в испытательной среде она составляет порядка 100–155 мкм, а через 4320 часов – порядка 220–310 мкм.

При этом данные объемные дефекты в экспонированных образцах по сравнению с образцами, не подвергшимся экспонированию, увеличивают скорость водопоглощения, что может привести к снижению срока эксплуатации ПКМ, особенно в зимний период (рис. 6).

Для определения реального срока эксплуатации надземной части ПКМ-сваи сделали пересчет на натурные условия Ямalo-Ненецкого АО. В результате расчета с применением полученного регрессионного уравнения показано, что через 9610 часов произойдет падение предела прочности базальтопластика на 10%. За это время ПКМ накопит 34435 МДж/м<sup>2</sup> солнечной радиации.

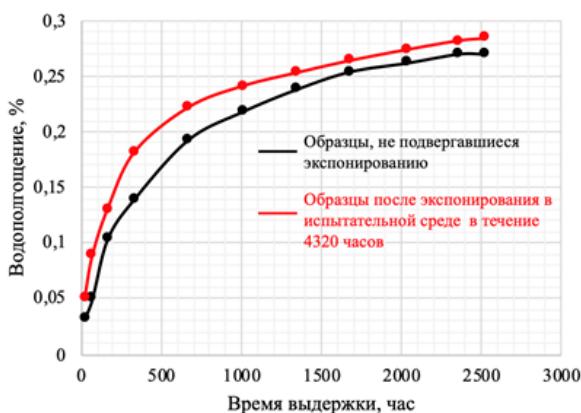


Рис. 6. Изменение водопоглощения после образования микротрещин от воздействия УФ-излучения, температуры и влаги

Fig. 6. Change in water absorption after the formation of microcracks due to exposure to UV radiation, temperature and moisture

На основании вышеизложенного выход из строя надземной части ПКМ-сваи, ориентированной на север, произойдет примерно через 30 лет, а ориентированной на юг – через 15 лет. При этом важно понимать, что испытательная среда, используемая в работе, обладала более жестким воздействием на опытные образцы ПКМ, нежели натуральная, что положительно скажется на фактическом сроке эксплуатации изделия.

Таким образом, совместное воздействие УФ-облучения и термовлажностных режимов требует учета с точки зрения деградации структуры ПКМ и изменения механических свойств во время его эксплуатации и должно являться частью инженерных расчетов по проектированию элементов различных конструкций капитального строительства.

### Заключение

В ходе проведения работы качественно и количественно оценили деградацию структуры и свойств свайных труб, изготовленных из стекло- и базальтопластика, под воздействием УФ-излучения и сделали следующие выводы:

1. Трубы из стекло- и базальтопластика имеют одинаковую стойкость к воздействию УФ-излучения. Однако за счет более высоких механических свойств и меньшей склонности к водопоглощению базальтопластиковые трубы, изготовленные методом мокрой перекрестной намотки, являются предпочтительным выбором для производства свайных труб.

2. Определено отсутствие изменений механических свойств (с учетом доверительных интервалов) при малом воздействии УФ-излучения, тепла и влаги (до 168 часов). Дальнейшая выдержка образцов в испытательной среде (4320 часов) приводит к падению предела прочности (на 7%) и относительного удлинения (на 12%). Упругие свойства, с учетом доверительных интервалов, не изменились. Однако ГОСТ 9.708–83 позволяет производить испытания с короткой выдержкой, что может привести к получению недостоверных результатов.

3. Причина деградации поверхности опытных образцов заключается в синергетическом эффекте эрозии, приводящей к микрорастескиванию матрицы с последующим образованием объемных дефектов. Данные дефекты являются концентраторами напряжений, которые ускоряют рост и развитие трещин по всему сечению ПКМ при разрушении, что приводит к падению механических свойств. Кроме того, подобное нарушение сплошности поверхности может приводить к повышению уровня водопоглощения, что негативно скажется на работоспособности ПКМ в зимний период.



4. Полученные регрессионные уравнения снижения механических свойств позволяют прогнозировать поведение надземной части сваи из базальтопластика под воздействием на него УФ-излучения, температуры и влаги.

5. Исходя из расчетных данных показано, что выход из строя надземной части сваи из базальтопластика, расположенной вертикально и ориентированной на север, в условиях Ямalo-Ненецкого АО произойдет примерно через 30 лет, а ориентированной на юг – через 15 лет.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Липенина Е.Е. Технико-экономическое обоснование освоения месторождений прибрежных зон акваторий северных морей с использованием технологии строительства насыпных островов // Экономика будущего: тренды, вызовы и возможности. 2023. С. 247–252.

[2] Грузин А.В. Аналитические исследования напряженно-деформированного состояния грунта в околосвайном пространстве фундаментов объектов нефтегазовой и нефтеперерабатывающей отраслей // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. 2020. С. 143.

[3] Ширманов К.С., Михайлов Ю.И. Проблемы логистики капитального строительства газотранспортной системы в восточных регионах РФ и пути их решения // Международный программный комитет. 2023. С. 203–206.

[4] Ялыгин С.А., Ермаков Б.С., Столяров А.В., Койнов Е.Г., Швецов О.В., Шапошников Н.О., Токарев В.О., Голиков Н.И. Влияние послесварочной термической обработки на эксплуатационные свойства стали 09Г2С, применяемой для изготовления буроопускных свай // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024. Т. 9, № 1 (31). С. 173–182. DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-1-173-182>

[5] Щербанин Ю.А. Освоение новых нефтегазовых месторождений: логистика снабжения // Экономическая политика России в межотраслевом и пространственном измерении. 2020. С. 141–143.

[6] Акульшина А.А., Федоркова М.В. Особенности строительства в условиях мерзлых и вечномерзлых грунтов // Современные перспективы развития гибких производственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе. 2023. С. 131–134.

[7] Hewage S.A., Tang C.-S., Mehta Y., Zhu C. Investigating cracking behavior of saline clayey soil under cyclic freezing-thawing effects, Engineering Geology, 326 (2023) 107319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107319>

[8] Горелик Я.Б., Земеров И.В. Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6, № 1 (21). С. 10–40. DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40>

[9] Ермаков Б.С., Швецов О.В., Вологжанина С.А., Нечаев Д.В., Карпов И.Д. Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур // Горная промышленность. 2024. № 5S. С. 198–203. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>

[10] Кудрявцев С.А., Сахаров И.И., Парамонов В.Н. Создание условий нормативного состояния деградирующих многолетнемерзлых оснований зданий и сооружений Дальневосточного федерального округа и Арктики // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году. 2022. Т. 2. С. 157–164.

[11] Boyarintsev A.V. Polymer and Composite Piles. International and Russian Experience, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 57 (2020) 415–421. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09686-9>

- [12] Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. Т. 89, № 6–7. С. 29–37. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
- [13] Riahinezhad M., Hallman M., Masson J.-F. Critical review of polymeric building envelope materials: Degradation, durability and service life prediction, Buildings, 11 (7) (2021) 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11070299>
- [14] Ратнер С.Б., Ярцев В.П. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность. М.: Химия, 1992. 319 с.
- [15] Лебедев М.П., Старцев О.В., Петров М.Г., Копырин М.М. Образование микротрещин при климатическом старении полимерных композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 4. С. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11>
- [16] Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, Journal of Composite Materials, 36 (24) (2002) 2713–2733. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998027616755>
- [17] Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y.-B., Kumosa M. Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, Polymer Degradation and Stability, 131 (2016) 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025>
- [18] Гусев Е.Л., Черных В.Д. Перспективные подходы и методы к решению проблемы прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата. 2024. С. 253–256. DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-253-256>
- [19] Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chaillan J.F. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano-to macro-scale, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 68 (2015) 235–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.028>
- [20] Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the destruction of polymer composite materials in a cold climate, Procedia Structural Integrity, 30 (2020) 71–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.012>
- [21] Вапирос Ю.М., Дзюба А.С., Голован В.И. Накопление повреждений в ПКМ авиационных конструкций под воздействием климатических факторов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. № 3. С. 9.
- [22] Корецкая Л., Александрова Т. Структурные изменения неизбежны. Влияние воды на свойства стеклопластиков // Вода Magazine. 2007. № 2.
- [23] Ермаков Б.С., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Особенности применения полимерных композиционных материалов при обустройстве нефтегазовых месторождений Арктического пояса // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 112–121. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31108>
- [24] Awaja F., Nguyen M.-T., Zhang S., Arhatari B. The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.015>
- [25] Awaja F., Zhang S., Tripathi M., Nikiforov A., Pugno N. Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, Progress in Materials Science, 83 (2016) 536–573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.007>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НЕЧАЕВ Даниил Валерьевич** – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: nechaev\_dv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>



**ЕРМАКОВ Борис Сергеевич** – главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: ermakov55@bk.ru

**ШВЕЦОВ Олег Викторович** – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: shvec\_off@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

## REFERENCES

- [1] E.E. Lipenina, Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie osvoeniia mestorozhdenii pribrezhnykh zon akvatorii severnykh morei s ispol'zovaniem tekhnologii stroitel'stva nasypnykh ostrovov [Feasibility study for the development of deposits in coastal zones of the northern seas using the technology of building artificial islands], Ekonomika budushchego: trendy, vyzovy i vozmozhnosti [Economy of the Future: Trends, Challenges and Opportunities], (2023) 247–252.
- [2] A.V. Gruzin, Analiticheskie issledovaniia napriazhenno-deformirovannogo sostoianiiia grunta v okolosvainom prostranstve fundamentov ob"ektorov neftegazovoi i neftepererabatyvaiushchei otraslei [Analytical studies of the stress-strain state of soil in the near-pile space of foundations of oil and gas and oil refining industries], Tekhnika i tekhnologiiia neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva [Equipment and technology of petrochemical and oil and gas production], (2020) 143.
- [3] K.S. Shirmanov, Iu.I. Mikhailov, Problemy logistiki kapital'nogo stroitel'stva gazotransportnoi sistemy v vostochnykh regionakh RF i puti ikh resheniiia [Problems of logistics of capital construction of gas transportation system in the eastern regions of the Russian Federation and ways of their solution], Mezhdunarodnyi programmnyi komitet [International Program Committee], (2023) 203–206.
- [4] S.A. Yalygin, B.S. Ermakov, A.V. Stolyarov, E.G. Koinov, O.V. Shvetsov, N.O. Shaposhnikov, V.O. Tokarev, N.I. Golikov, The influence of heat treatment after high-frequency welding on the operational properties of steel 09G2S used for the manufacturing of drilled piles, PRONEFT. Professionally about Oil, 9 (1 (31)) (2024) 173–182. DOI: <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-1-173-182>
- [5] Iu.A. Shcherbanin, Osvoenie novykh neftegazovykh mestorozhdenii: logistika snabzheniiia [Development of new oil and gas fields: supply logistics], Ekonomicheskaiia politika Rossii v mezhtraslevom i prostranstvennom izmerenii [Economic policy of Russia in inter-sectoral and spatial dimensions], (2020) 141–143.
- [6] A.A. Akul'shina, M.V. Fedorkova, Osobennosti stroitel'stva v usloviakh merzlykh i vechnomerzlykh gruntov [Features of construction in frozen and permafrost soils], Sovremennye perspektivy razvitiia gibkikh proizvodstvennykh sistem v promyshlennom grazhdanskom stroitel'stve i agropromyshlennom komplekse [Modern prospects for the development of flexible manufacturing systems in industrial civil construction and the agro-industrial complex], (2023) 131–134.
- [7] S.A. Hewage, C.-S. Tang, Y. Mehta, C. Zhu, Investigating cracking behavior of saline clayey soil under cyclic freezing-thawing effects, Engineering Geology, 326 (2023) 107319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107319>
- [8] Ja.B. Gorelik, I.V. Zemirov, Influence of the surface water reservoir to the thermal regime of frozen ground, TYUMEN STATE UNIVERSITY HERALD. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 6 (1 (21)) (2020) 10–40. DOI: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40>
- [9] B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.A. Vologzhanina, D.V. Nechaev, I.D. Karpov, The influence of water-repellent coating on the performance of structures made of polymer composite materials in conditions of extremely low temperatures, Russian Mining Industry, 5S (2024) 198–203. DOI: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>



- [10] **S.A. Kudryavtsev, I.I. Sakharov, V.N. Paramonov**, Creating conditions for the regular state of degrading permafrost buildings and structures in the far eastern federal district and the Arctic, Fundamental'nye, poiskovye i prikladnye issledovaniia RAASN po nauchnomu obespecheniiu razvitiia arkhitekturny, gradostroitel'stva i stroitel'noi otrassli Rossiiskoi Federatsii v 2021 godu [Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021], 2 (2022) 157–164.
- [11] **A.V. Boyarintsev**, Polymer and Composite Piles. International and Russian Experience, Soil Mechanics and Foundation Engineering, 57 (2020) 415–421. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09686-9>
- [12] **M.S. Doriomedov**, Russian and world market of polymer composites (review), Trudy VIAM (Proceedings of VIAM), 89 (6–7) (2020) 29–37. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
- [13] **M. Riahinezhad, M. Hallman, J.-F. Masson**, Critical review of polymeric building envelope materials: Degradation, durability and service life prediction, Buildings, 11 (7) (2021) 299. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11070299>
- [14] **S.B. Ratner, V.P. Iartsev**, Fizicheskaya mekhanika plastmass. Kak prognoziruiut rabotosposobnost' [Physical Mechanics of Plastics. How to Predict Performance]. Moscow: Khimiia, 1992. 319 p.
- [15] **M.P. Lebedev, O.V. Startsev, M.G. Petrov, M.M. Kopyrin**, Formation of microcracks during climatic aging of polymer composite materials, Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik (All materials. Encyclopaedic reference manual), 4 (2022) 2–11. DOI: <https://doi.org/10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11>
- [16] **B.G. Kumar, R.P. Singh, T. Nakamura**, Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, Journal of Composite Materials, 36 (24) (2002) 2713–2733. DOI: <https://doi.org/10.1177/0021998027616755>
- [17] **T. Lu, E. Solis-Ramos, Y.-B. Yi, M. Kumosa**, Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, Polymer Degradation and Stability, 131 (2016) 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025>
- [18] **E.L. Gusev, V.D. Chernykh**, Perspektivnye podkhody i metody k resheniiu problemy prognozirovaniia opredeliaushchikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov [Promising approaches and methods for solving the problem of predicting the defining characteristics of composite materials], Fiziko-tehnicheskie problemy dobychi, transporta i pererabotki organicheskogo syr'ia v usloviakh kholodnogo klimata [Physical and technical problems of extraction, transportation and processing of organic raw materials in cold climate conditions], (2024) 253–256. DOI: <https://doi.org/10.24412/cl-37255-2024-1-253-256>
- [19] **L. Belec, T.H. Nguyen, D.L. Nguyen, J.F. Chailan**, Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano-to macro-scale, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 68 (2015) 235–241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.09.028>
- [20] **A.K. Kychkin, O.V. Startsev, M.P. Lebedev, V.V. Polyakov**, Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate, Procedia Structural Integrity, 30 (2020) 71–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.12.012>
- [21] **Iu.M. Vapirov, A.S. Dziuba, V.I. Golovan**, Nakoplenie povrezhdenii v PKM aviatsionnykh konstruktsii pod vozdeistviem klimaticheskikh faktorov [Accumulation of damage in PCM of aircraft structures under the influence of climatic factors], Novosti materialovedeniia. Nauka i tekhnika [Materials Science News. Science and Technology], 3 (2013) 9.
- [22] **L. Koretskaia, T. Aleksandrova**, Strukturnye izmeneniiia neizbezhny. Vliianie vody na svoistva stekloplastikov [Structural changes are inevitable. The effect of water on the properties of fiberglass], Water Magazine, 2 (2007).
- [23] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.B. Ermakov**, Features of using polymer composite materials in the development of oil and gas fields in the Arctic belt, Global Energy, 31 (01) (2025) 112–121, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31108>
- [24] **F. Awaja, M.-T. Nguyen, S. Zhang, B. Arhatari**, The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.12.015>

[25] **F. Awaja, S. Zhang, M. Tripathi, A. Nikiforov, N. Pugno**, Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, *Progress in Materials Science*, 83 (2016) 536–573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.07.007>

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Daniil V. NECHAEV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: nechaev\_dv@spbstu.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>

**Boris S. ERMAKOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: ermakov55@bk.ru

**Oleg V. SHVETSOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: shvec\_off@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

**Поступила: 17.06.2025; Одобрена: 16.07.2025; Принята: 18.07.2025.**  
**Submitted: 17.06.2025; Approved: 16.07.2025; Accepted: 18.07.2025.**



Научная статья

УДК 620.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31305>



*P.В. Кузнецов<sup>1</sup>✉, В.Г. Теплухин<sup>1</sup>, Е.О. Ольховик<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия

✉ [Spaun1605@rambler.ru](mailto:Spaun1605@rambler.ru)

## **К ВОПРОСУ УПРОЧНЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

**Аннотация.** В данном исследовании приведены результаты сравнительного анализа свойств азотированных слоев, полученных в результате газового и ионного азотирования конструкционных легированных сталей, применяемых для изготовления ответственных, высоконагруженных деталей судовых дизелей. В работе проведено сравнительное исследование износостойкости, усталостной прочности и кавитационной стойкости легированных сталей после газового и ионного азотирования; показано преимущество последнего способа по данным характеристикам. Исследовано распределение остаточных напряжений после газового и ионного азотирования. Разработан технологический процесс ионного азотирования деталей судовых дизелей из сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА, который имеет преимущества по сравнению с классическими технологиями химико-термической обработки поверхности упрочняемых деталей.

**Ключевые слова:** дизель, ионное азотирование, износостойкость, усталостная прочность, кавитационная стойкость, легированная сталь.

**Для цитирования:**

Кузнецов Р.В., Теплухин В.Г., Ольховик Е.О. К вопросу упрочнения высоконагруженных деталей, работающих в узлах трения судовых дизелей // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 74–85. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31305>



R.V. Kuznetsov<sup>1</sup>✉, V.G. Teplukhin<sup>1</sup>, E.O. Olkhovik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russia

✉ Spaun1605@rambler.ru

## ON STRENGTHENING METHODS FOR HIGHLY LOADED COMPONENTS OPERATING IN FRICTION UNITS OF MARINE DIESEL ENGINES

*Abstract.* This study presents the results of a comparative analysis of the properties of nitrided layers obtained by gas and ion nitriding of structural alloy steels used to manufacture critical, highly loaded parts of marine diesel engines. The paper presents a comparative study of wear resistance, fatigue strength and cavitation resistance of alloy steels after gas and ion nitriding; the advantage of the latter method in terms of these characteristics is shown. The distribution of residual stresses after gas and ion nitriding is studied. A technological process for ion nitriding of marine diesel engine parts made of 38CrAl, 38Cr2MoUAl and 18Cr2Ni4MoAl steels has been developed, which has advantages over classical technologies of chemical-thermal treatment of the surface of the parts being strengthened.

*Keywords:* diesel, ion nitriding, wear resistance, fatigue strength, cavitation resistance, alloy steel.

*Citation:*

Kuznetsov R.V., Teplukhin V.G., Olkhovik E.O., On strengthening methods for highly loaded components operating in friction units of marine diesel engines, Global Energy, 31 (03) (2025) 74–85, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31305>

**Введение.** Темпы роста отечественного машиностроительного производства диктуют необходимость пересмотра серийных процессов в пользу более современных технологических решений [1–3]. При этом ключевым показателем конкурентоспособности предприятий становится ритмичность выпуска продукции с соответствующим повышением ее качества и надежности. Решение данной задачи в условиях реального серийного производства, как правило, ограничивается отсутствием достаточной научно-технической базы, необходимой для внедрения современных материалов и технологий. Традиционно при изготовлении высоконагруженных деталей из легированных инструментальных сталей прибегают к дополнительному поверхностному упрочнению путем химико-термической обработки – азотирования и цементации [4–6]. Если последняя практически безальтернативно подразумевает применение теплового нагрева в среде газа, то технология азотирования сегодня может быть реализована несколькими способами, наиболее перспективным из которых можно считать ионно-плазменную обработку. Особенность данного метода упрочнения заключается в низкотемпературном ( $480\div550^{\circ}\text{C}$ ) воздействии ионов азота на поверхность металла в плазме тлеющего разряда, что позволяет получать поверхностно упрочненный слой заданного фазового состава в максимально короткие сроки [6–9].

Однако информация о влиянии выбранного способа азотирования конструкционных легированных сталей на функциональные и специальные конечные свойства полученных изделий на сегодняшний день подробно не исследована [10, 11].

Целью данной работы является изучение влияния способа диффузионного упрочнения сталей 38Х2МЮА, 18Х2Н4МА и 38ХА на их износостойкость, усталостную прочность и кавитационную



стойкость после газового и ионного азотирования, а также исследование распределения остаточных напряжений после проведения поверхностного упрочнения.

### Материалы и методы исследования

В качестве материала исследования использовали горячекатаные заготовки диаметром 30÷50 мм из сталей 38Х2МЮА, 18Х2Н4МА и 38ХА. Перед азотированием мерные заготовки подвергали улучшению на твердость HRC<sub>э</sub> 37÷30 единиц путем термической обработки.

Газовое азотирование проводили в камерных электрических печах периодического действия, ионное – в установке ИОН-75 конструкции отечественной компании «Ионные Технологии».

Режимы азотирования и полученные результаты твердости и глубины азотированного слоя представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Режимы азотирования, полученные значения твердости и глубины азотированного слоя  
в образцах из стали 38Х2МЮА, 18Х2Н4МА, 38ХА**

Table 1

**Nitriding modes, obtained values of hardness and depth of the nitrided layer  
in samples made of 38Cr2MoUAl, 18Cr2Ni4MoAl, 38CrAl steel**

Сталь	Номер режима	Вид и температура азотирования	<i>h</i> , мм	HV
38Х2МЮА	1	Газовое (NH <sub>3</sub> ), 520°C, 25ч + 540°, 45ч	0,57÷0,67	891÷966/870÷1018
	2	Ионное (NH <sub>3</sub> ), 550°C, 7ч	0,26÷0,34	810÷857/824÷946
	3	Ионное (20 % NH <sub>3</sub> + 80% N <sub>2</sub> ), 550°C, 4ч	0,20÷0,31	891÷927/752÷858
18Х2Н4МА	4	Газовое (NH <sub>3</sub> ), 490°C, 40ч	0,24÷0,36	677÷701/707÷724
	5	Ионное (NH <sub>3</sub> ), 500°C, 7ч	0,24÷0,35	655÷677/673÷724
	6	Ионное (NH <sub>3</sub> ), 550°C, 7ч	0,31÷0,36	603÷613/606÷707
38ХА	7	Газовое (NH <sub>3</sub> ), 490°C, 12ч	0,18÷0,26	655÷677/642÷649
	8	Ионное (NH <sub>3</sub> ), 550°C, 7ч	0,16÷0,30	644÷655/665÷690
	9	Ионное (NH <sub>3</sub> ) 550°C, 5ч + (20% NH <sub>3</sub> + 80% N <sub>2</sub> ), 550°C, 2ч	0,16÷0,36	623÷644/620÷657

Обозначения: *h* – толщина азотированного слоя.

Примечания: 1. Ионное азотирование проводили при давлении 400 Па, газовое азотирование – при давлении 0,10 МПА. 2. В числителе дана твердость HV, определенная при нагрузке 50 Н, в знаменателе – при нагрузке 100 Н.

Критерии для оценки качества азотированного слоя выбирали исходя из требований, предъявляемых к азотируемым деталям отечественных серийных судовых дизелей [3, 4, 12]. Так, наряду с определением толщины, твердости и фазового состава азотированного слоя проводили испытания на выносливость и износостойкость, исследовали распределение остаточных напряжений в поверхностных слоях, оценивали степень хрупкости и кавитационную стойкость азотированных слоев.

Усталостные испытания проводили на гладких образцах диаметром 5,97 мм и на образцах с кольцевым надрезом глубиной 0,75 мм с радиусом закругления во впадине 0,2 мм и углом раскрытия 60° [13]. Теоретический коэффициент концентрации напряжений такого надреза K = 4,88.

Испытания на усталостную прочность проводили на машине МУИ-6000, обеспечивающей чистый изгиб при вращении, на базе *N* = 10<sup>7</sup> циклов.



Испытания на изнашивание и контактную прочность проводили на машине МИ-1М [14, 15] при трении качения с удельным проскальзыванием  $\delta = 15\%$  на роликах диаметром 28,6 мм по следующей методике: два ролика одновременно вращались в разные стороны с частотой 425 и 360 об/мин. Образцы испытывали за 6 этапов, с увеличением нагрузки от одного к другому. Максимальные контактные напряжения варьировали от 350 до 800 Н/мм<sup>2</sup>. Образцы находились под действием каждой последующей нагрузки в течение 40 ч, по окончании этапа определяли износ образцов по уменьшению их массы. В качестве смазки при испытаниях использовали масло МС20 (ГОСТ 21743-21).

Хрупкость азотированного слоя оценивали по результатам испытаний на изгиб под нагрузкой [16], приложенной к центру азотированной с двух сторон пластины размером 2×10×100 мм. Расстояние между опорами составило 70 мм. В процессе испытаний измеряли стрелу прогиба ( $f$ ), соответствующую максимальной контактной нагрузке. Измерение остаточных напряжений первого рода, а также рентгеноструктурный фазовый анализ по толщине упрочненного слоя проводили на стационарном рентгеновском дифрактометре в хромовом К<sub>α</sub>-излучении после послойного электрополирования образцов размером 3×6×10 мм. Методика определения остаточных напряжений основана на прецизионном измерении смещения дифракционных линий [17]. Напряжения рассчитывали по формуле:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{(\varepsilon_{\psi_2\varphi} - \varepsilon_{\psi_1\varphi})}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1},$$

где  $E$  – модуль нормальной упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\varepsilon_{\psi\varphi} = (d_{\psi\varphi} - d_0)/d_0$  (здесь  $d_0$  – исходное межплоскостное расстояние;  $d_{\psi\varphi}$  – межплоскостное расстояние в направлении  $\psi, \varphi$ ).

Испытания на кавитационную стойкость производились на установке, разработанной ЦНИИМФ, по режиму: частота колебаний – 8000 Гц, амплитуда колебаний – 0,065 мм, время – 3 ч, среда – вода (невская), температура среды – 17÷20°C. Оценка результатов кавитационной стойкости образцов производилась по потере веса образца после каждого часа испытаний [18].

### Результаты исследований

Как следует из приведенных в табл. 1 результатов, толщина и твердость азотированного слоя на сталях 18Х2Н4МА и 38ХА после газового и ионного азотирования по исследованным режимам примерно одинаковы. Однако при этом продолжительность ионного азотирования для сталей 18Х2Н4МА и 38ХА меньше в 6 и 2 раза соответственно, чем газового. Для стали 38Х2МЮА при одинаковом уровне твердости толщина слоя после ионного азотирования примерно в 2 раза меньше, чем после газового. Однако следует учитывать, что длительность процесса при ионном азотировании также значительно меньше, чем при газовом.

Как показали анализ многочисленных работ отечественных и зарубежных исследователей, а также полученные нами результаты, ионное азотирование эффективно только в случае получения азотированного слоя небольшой толщины – не более 0,3 мм [6, 9, 10]. При азотировании на большую толщину преимущества ионного азотирования по сравнению с газовым теряются: длительность выдержки практически становится одинаковой при обоих процессах, так как при азотировании на толщину более 0,3 мм определяющим фактором ускорения насыщения становятся не процессы, связанные с активацией поверхности азотируемой детали (увеличение плотности дефектов), а процессы диффузии в металле, которые в основном зависят от температуры и длительности выдержки и протекают практически одинаково как при ионном азотировании, так и при газовом. Твердость азотированного слоя на сталях 18Х2Н4МА и 38ХА при ионном и газовом азотировании по исследуемым режимам имеет близкие значения (HV 824÷946).

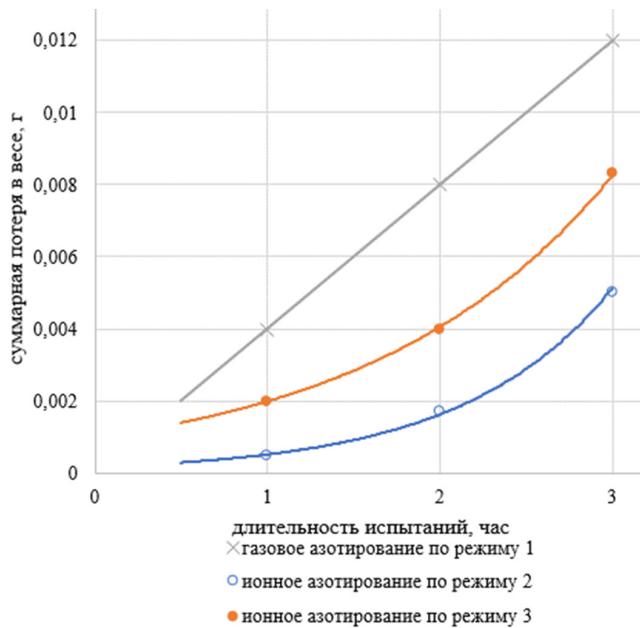


Рис. 1. Потеря массы азотированных образцов из стали 38Х2МЮА в процессе кавитационных испытаний: газовое азотирование по режиму 1, ионное азотирование по режиму 2, ионное азотирование по режиму 3

Fig. 1. Weight loss of nitrided samples made of 38Cr2MoUAl steel during cavitation tests:  
a – gas nitriding according to mode 1; b – ion nitriding according to mode 2; c – ion nitriding according to mode 3

Анализ результатов испытаний на изгиб азотированных пластин показал, что максимальные напряжения изгиба ( $\sigma_u$ ) при газовом азотировании стали 38Х2МЮА соответствует  $1150 \text{ Н}/\text{мм}^2$ , а при ионном азотировании –  $2000 \text{ Н}/\text{мм}^2$ ; стрела прогиба  $f$ , зафиксированная при максимальной нагрузке азотированных пластин, равна 5 и 8 мм соответственно. Для стали 18Х2Н4МА также получены более высокие значения максимального напряжения и стрелы прогиба после ионного азотирования по сравнению с газовым ( $\sigma_u$  равно 2400 и  $1800 \text{ Н}/\text{мм}^2$ ;  $f$  равна 9÷12 и 7 мм соответственно).

Полученные данные свидетельствуют о более высокой хрупкости азотированного слоя при газовом азотировании по сравнению с ионным. По данным рентгеноструктурного фазового анализа, после ионного азотирования поверхностный слой толщиной 20÷45 мкм состоит из гомогенной зоны нитридных соединений ( $\gamma'$ -фаза  $\text{Fe}_4\text{N}$ ) и диффузионной зоны, содержащей азотный феррит и нитриды легирующих элементов. После газового азотирования в поверхностной нитридной зоне наряду с  $\gamma'$ -фазой образуется  $\epsilon$ -фаза ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ), что приводит к получению слоя с более высокой хрупкостью и твердостью, чем после ионного азотирования.

Результаты исследования выносливости гладких образцов и образцов с надрезом из сталей 38Х2МЮА, 18Х2Н4МА и 38ХА представлены на рис. 1–3. Здесь видно, что после ионного азотирования предел выносливости сталей 38ХА, 38Х2МЮА примерно на 5%, а стали 18Х2Н4МА – на 7% выше, чем после газового азотирования.

Характерно, что долговечность сталей в области ограниченной выносливости во всех случаях выше после газового азотирования. Установлено (рис. 1–3), что образцы с надрезом всех исследованных сталей после ионного азотирования по оптимальному режиму имеют более высокий предел выносливости, чем после газового азотирования. Особенно высокий эффект повышения предела выносливости при ионном азотировании получен для стали 38ХА ( $\sigma_{-1k}$  равно 400 и  $280 \text{ Н}/\text{мм}^2$  после ионного и газового азотирования соответственно).

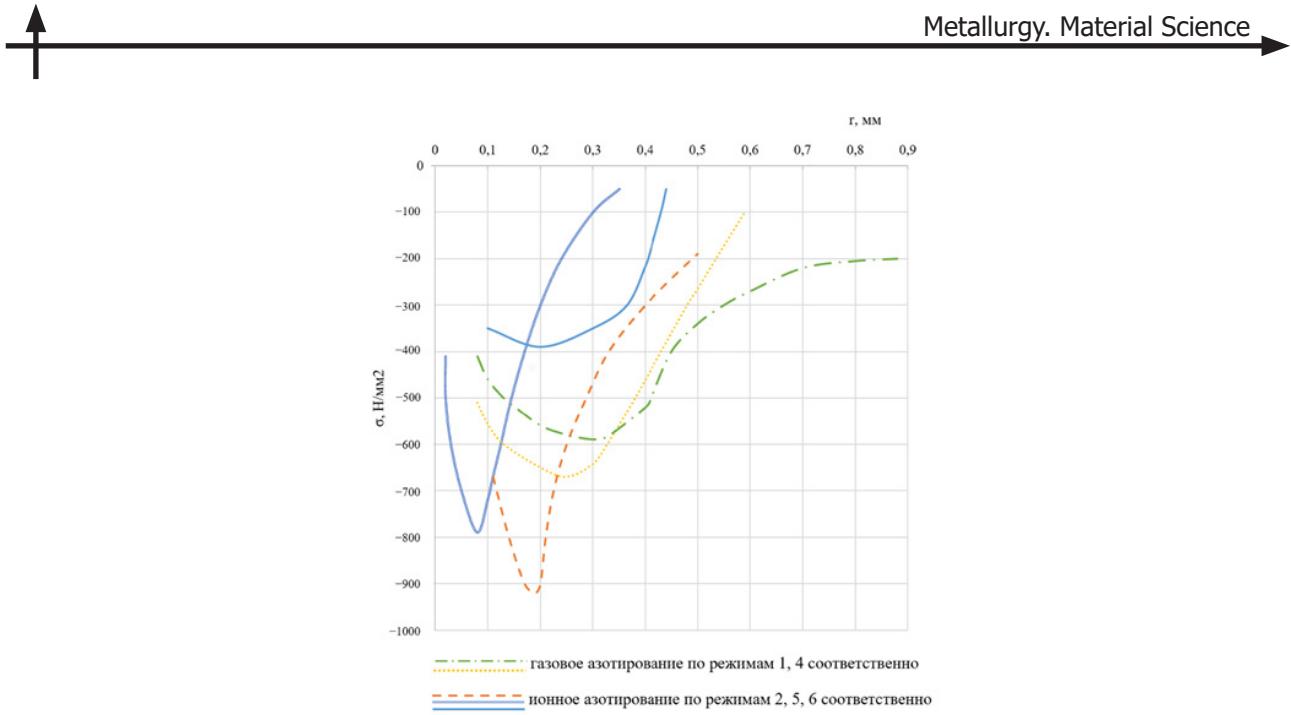


Рис. 2. Эпюры распределения остаточных напряжений по толщине азотированного слоя  
( $r$  – расстояние от поверхности образца) сталей 38Х2МЮА (обозначение: желтые точки и оранжевый пунктир)  
и 18Х2Н4МА (обозначение: зеленые тире с точками, голубая и синяя линии)

Fig. 2. Distribution diagrams of residual stresses across the thickness of the nitrided layer  
( $r$  is the distance from the sample surface) of 38Cr2MoUAl (designation: yellow dots and orange dashed line)  
and 18Cr2Ni4MoAl (designation: green dashes with dots, light blue and blue lines) steels

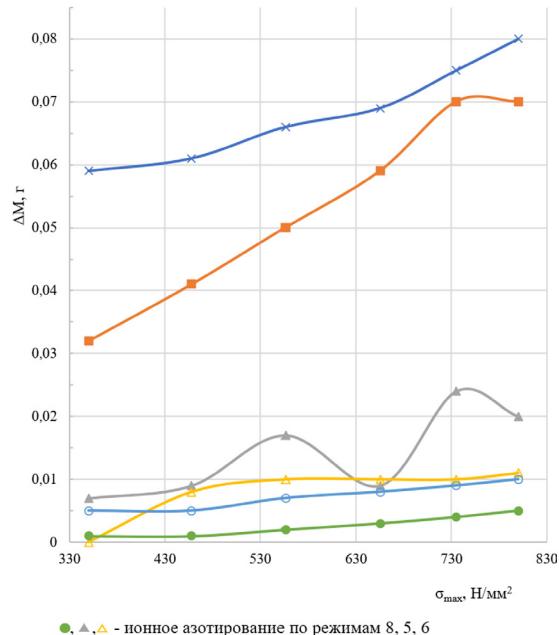


Рис. 3. Изменение массы азотированных роликов из сталей 38Х2МЮА (обозначение: линии с крестиком,  
голубым и зеленым кружками) и 18Х2Н4МА (обозначение: линии с оранжевым квадратом, желтым  
и серым треугольниками) в зависимости от контактных напряжений при испытаниях на изнашивание

Fig. 3. Change in the mass of nitrided rollers made of 38Cr2MoUAl (designation:  
lines with a cross, blue and green circles) and 18Cr2Ni4MoAl (designation: lines with an orange square,  
yellow and gray triangles) steels depending on contact stresses during wear tests

## Обсуждение

Известно, что влияние поверхностной обработки на предел выносливости конструкционных сталей связан в значительной степени с распределением остаточных напряжений [17, 19], изменяющих асимметрию цикла и сдвигающих область нагрузки на полной диаграмме предельных напряжений к средним сжимающим или средним растягивающим напряжениям.

Эпюры распределения остаточных напряжений сталей 18Х2Н4МА и 38Х2МЮА после азотирования по исследованным режимам показаны на рис. 4. Видно, что на поверхности образцов во всех случаях возникают сжимающие напряжения: при этом после ионного азотирования сжимающие остаточные напряжения располагаются в более тонком поверхностном слое, что связано с меньшей толщиной диффузионного насыщения. Максимум сжимающих напряжений после ионного азотирования больше по абсолютной величине и находится ближе к поверхности, чем после газового азотирования, т.е. создается «кольцо сжимающих напряжений».

По эпюрам распределения остаточных напряжений в азотированном слое можно было бы предположить значительные различия в пределах выносливости гладких образцов после газового и ионного азотирования. Однако в данном исследовании практически не наблюдалось такого различия для гладких образцов, и только при испытаниях на усталость образцов с надрезом установлено значительное повышение предела выносливости исследованных сталей после ионного азотирования. Это несоответствие можно объяснить, по-видимому, тем, что в более пластичном материале, каким является азотированный слой после ионного азотирования (по данным испытаний азотированных пластин на хрупкость), остаточные напряжения релаксируют быстрее в процессе циклических нагрузений, чем в слое, полученном при газовом азотировании. На образцах с надрезом пластическая деформация в связи с локализацией напряжений в районе концентратора затруднена, и эффект от действия более высоких остаточных напряжений, возникающих при ионном азотировании, проявляется сильнее.

В результате испытаний на изнашивание установлено (рис. 5), что более высокой износостойкостью обладают ролики после ионного азотирования. При этом суммарное уменьшение массы роликов из стали 38Х2МЮА после газового азотирования в 7–8 раз больше, чем после ионного азотирования. Такая же закономерность наблюдается и при испытании роликов из стали 18Х2Н4МА.

Полученные результаты подтверждают данные работы [15], где при оценке влияния фазового состава нитридной зоны на износостойкость сталей отмечается, что  $\gamma'$ -фаза ( $Fe_4N$ ) обладает более высокими антифрикционными свойствами, чем  $\epsilon$ -фаза ( $Fe_{2-3}N$ ).

Кавитационным испытаниям подвергались образцы из стали 38Х2МЮА после газового и ионного азотирования по режимам 2 и 3.

Из приведенных на рис. 6 данных следует, что образцы из стали 38Х2МЮА после ионного азотирования имеют более высокую кавитационную стойкость, чем после газового азотирования.

Состояние азотированной поверхности всех исследованных образцов в зоне интенсивной кавитации удовлетворительное, очагов кавитационного разрушения не наблюдается.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что ионное азотирование наряду с рядом технологических преимуществ позволяет получить на поверхности стальных деталей упрочненные слои с более высоким комплексом свойств, чем газовое, и тем самым позволяет повысить эксплуатационные характеристики деталей дизелей из сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА.

## Заключение

Полученные результаты дают возможность выполнить достаточно объективное сравнение двух технологий – газового и ионного азотирования – по некоторым параметрам, которые определяют конечные физико-механические свойства упрочняемых легированных сталей.

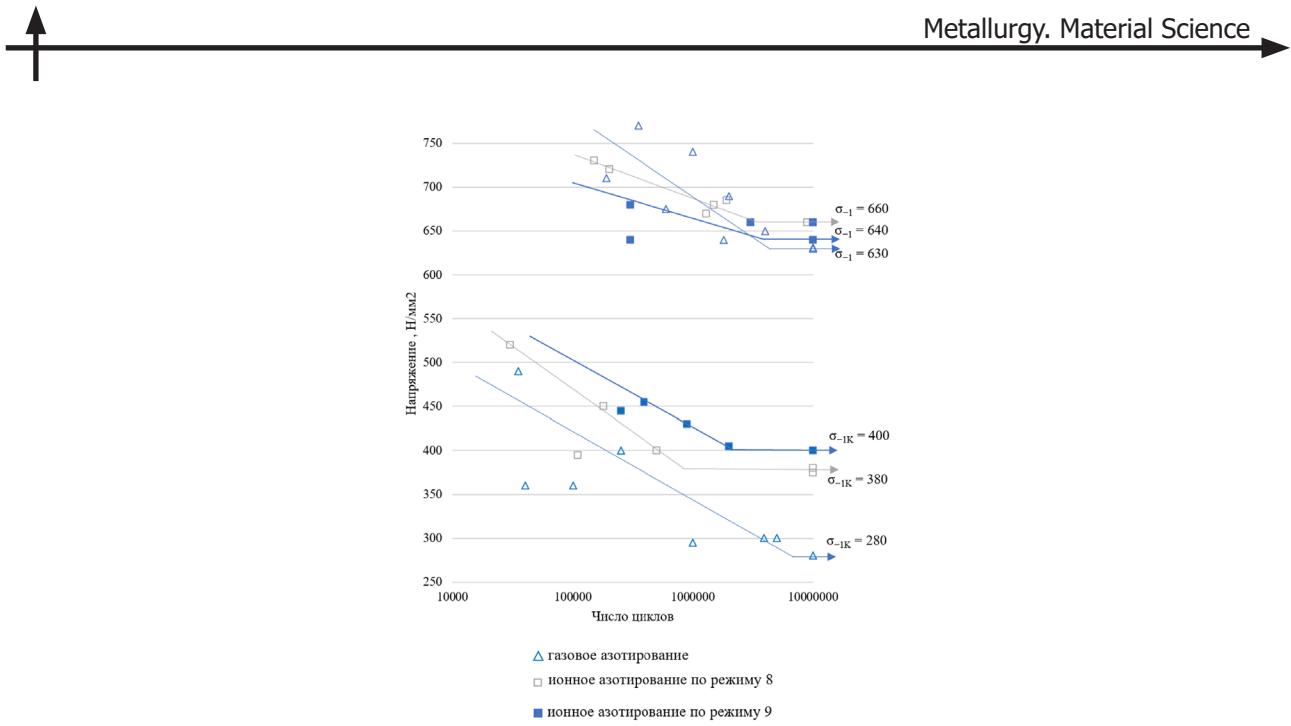


Рис. 4. Усталостные кривые стали 38ХА

Fig. 4. Fatigue curves of 38CrAl steel

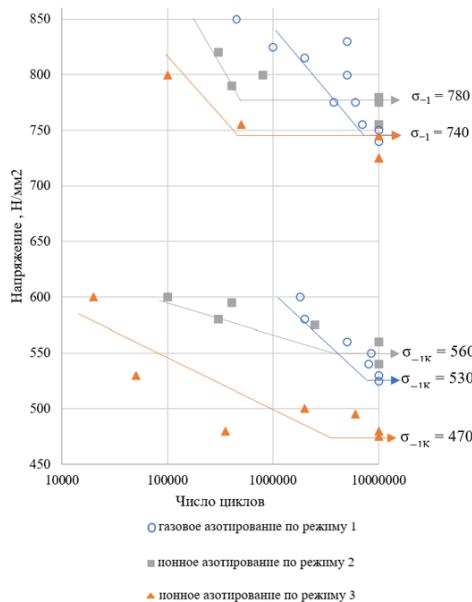


Рис. 5. Усталостные кривые стали 38Х2МЮА

Fig. 5. Fatigue curves of 38Cr2MoUAl steel

1. Выполнен анализ свойств азотированных слоев конструкционных легированных сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА, полученных в результате использования двух различных технологий: газового и ионного азотирования. Рассматриваются особенности применения технологий.

2. Разработан процесс ионного азотирования деталей дизелей из сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА, который имеет преимущества по сравнению с классическими технологиями химико-термической обработки поверхности упрочняемых деталей.

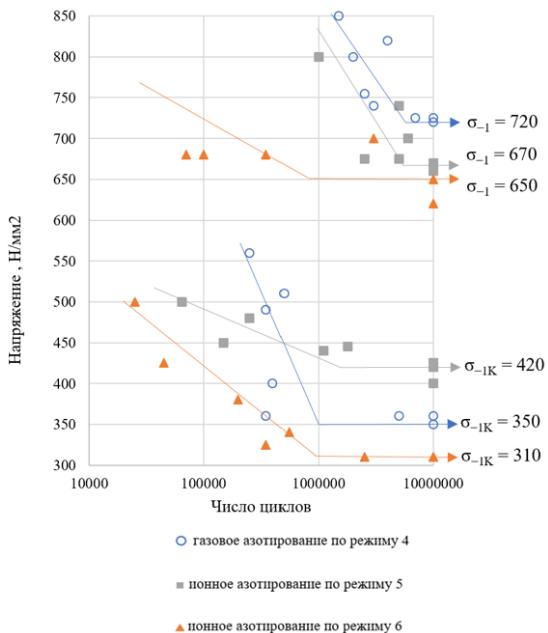


Рис. 6. Усталостные кривые стали 38Х2МЮА

Fig. 6. Fatigue curves of 38Cr2MoUAl steel

3. Проведено сравнительное исследование износостойкости, усталостной прочности и кавитационной стойкости легированных сталей 38ХА, 38Х2МЮА и 18Х2Н4МА после газового и ионного азотирования; показано преимущество последнего способа по этим характеристикам.

4. Исследовано распределение остаточных напряжений после газового и ионного азотирования образцов стали.

5. Выявлены значительные различия в физическом механизме формирования поверхностных механических свойств после газового и ионного азотирования, что объясняет отличия ряда конечных характеристик.

6. Сочетание технологий газового и ионного азотирования позволит направленно формировать заданные (необходимые) механические свойства поверхности рассматриваемых легированных сталей под определенные условия эксплуатации деталей.

7. Внедрение технологического процесса на производстве позволило: сократить длительность процесса по сравнению с газовым азотированием в 2–2,5 раза; улучшить воздушную атмосферу в цехе; сократить расходы аммиака; улучшить качество азотированного слоя.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Кузнецов Р.В., Кузнецов П.А. Исследование влияния газодинамического напыления промежуточного слоя на прочность соединения биметаллических материалов // Современное машиностроение. Наука и образование: материалы 13-й Международной научной конференции. 2024. С. 737–747. DOI: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-134>

[2] Kuznetsov R., Ol'khovik E., Palagushkin B. Investigation of the causes of inlet valve destruction of forced marine engines, AIP Conference Proceedings, 2647 (1) (2022) 060014. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0104203>

[3] Хмелевская В.Б., Мосейко Е.С., Ольховик Е.О. Исследование упрочнения деталей судового валопровода методом покрытия плазменным напылением с ультразвуковой обработкой // Вестник



государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 3. С. 81–87.

[4] Денисов А.С., Галиев Р.К., Кулаков А.Т. Анализ эффективности эксплуатации азотированных коленчатых валов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. Т. 86, № 3. С. 41–46.

[5] Скаков М.К., Батырбеков Э.Г., Ерыгина Л.А. Влияние электролитно-плазменного азотирования на свойства поверхностного слоя стали 34ХН1М // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. 2014. Ч. 3. С. 245–248.

[6] Ozturk M., Husem F., Karademir I., Maleki E., Amanov A., Unal O. Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding, Vacuum, 207 (2023) 111552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111552>

[7] Taskan Z., Ozturk E., Tezcan S., Mindivan H. Influence of plasma nitriding on tribological performance of HVOF sprayed AISI 316L and AISI 420 stainless steel coatings, Tribology and Materials, 3 (4) (2024) 187–196. DOI: <https://doi.org/10.46793/tribomat.2024.020>

[8] Reddy C.A.K., Srinivasan T., Venkatesh B. Effect of plasma nitriding on M50 NiL steel – A review, Materials Today: Proceedings, 52 (3) (2022) 1073–1077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.494>

[9] Wang G., Peng Y., Zhu Z., Chang X., Li C., Imran M., Wahab M.A. Fretting wear behaviour of high strength alloy steel induced by plasma nitriding and post-oxidation, Tribology International, 196 (2024) 109732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109732>

[10] Жуков А.А., Хасанова Л.А. Повышение эффективности процессов азотирования // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 183. С. 28–33.

[11] Шевчук А.М., Негров Д.А., Путинцев В.Ю. Влияние азотирования на структуру и свойства сталей // Техника и технологии машиностроения: материалы V Международной студенческой научно-практической конференции. 2016. С. 421–425.

[12] Шеховцева Е.В. Исследование микротвердости для обеспечения контактной выносимости конструкционных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2024. Т. 90, № 9. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-9-48-53>

[13] Кусков К.В., Сызранцева К.В. Сравнение усталостных характеристик образцов различной геометрии из стали 09Г2С // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2024. Т. 26, № 2. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2022.2.03>

[14] Антипов П.Е. и др. Сравнительный анализ износстойкости ионно-плазменных покрытий трибологического назначения // Актуальные проблемы науки и техники. 2024: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. 2024. С. 532.

[15] Агафонов С.В., Беломестных В.А. Испытания на износстойкость азотированной в электростатическом поле стали 38Х2МЮА // Вестник ИрГСХА. 2018. № 84. С. 136–142.

[16] Гахраманов В.Ф. Азотирование инструментальных сталей // The Scientific Heritage. 2021. № 62. С. 36–41.

[17] Акуличев А.Г., Трофимов В.В. Остаточные напряжения в нитроцементованной стали 20Х3М-ВФ-ш // Инженерный вестник Дона. 2010. Т. 14, № 4. С. 163–169.

[18] Митяев А.А., Беликов С.Б., Повело В.И. Повышение кавитационной стойкости вторичных силуминов // Литье и металлургия. 2007. Т. 43, № 3. С. 94–96.

[19] Webster G.A., Ezeilo A.N. Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, International Journal of Fatigue, 23 (1) (2001) 375–383. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00133-5)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КУЗНЕЦОВ Руслан Валерьевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: Spaun1605@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>

**ТЕПЛУХИН Василий Гельевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: cornfield@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

**ОЛЬХОВИК Евгений Олегович** – доцент, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», канд. техн. наук.

E-mail: olhovick@gmail.com

## REFERENCES

- [1] R.V. Kuznetsov, P.A. Kuznetsov, Investigation of the influence of gas-dynamic spraying of an intermediate layer on the strength of bimetallic materials joints, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Scientific Conference, (2024) 737–747. DOI: <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-134>
- [2] R. Kuznetsov, E. Ol'khovik, B. Palagushkin, Investigation of the causes of inlet valve destruction of forced marine engines, AIP Conference Proceedings, 2647 (1) (2022) 060014. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0104203>
- [3] V.B. Khmelevskaya, E.S. Moseiko, E.O. Ol'khovik, Research of hardening of ship propeller shaft by plasma spraying coverage with ultrasonic treatment, Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, 3 (2013) 81–87.
- [4] A.S. Denisov, R.K. Galiev, A.T. Kulakov, Performance analysis of nitrided crankshafts, Vestnik of Saratov State Technical University, 3 (86) (2020) 41–46.
- [5] M.K. Skakov, E.G. Batyrbekov, L.A. Erygina, Vliyanie elektrolitno-plazmennogo azotirovaniia na svoistva poverkhnostnogo sloia stali 34KHN1M [The influence of electrolytic plasma nitriding on the properties of the surface layer of 34XH1M steel], Elektrotehnika. Energetika. Mashinostroenie: sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh [Electrical engineering. Power engineering. Mechanical engineering: collection of scientific papers of the I International Scientific Conference of Young Scientists], 3 (2014) 245–248.
- [6] M. Ozturk, F. Husem, I. Karademir, E. Maleki, A. Amanov, O. Unal, Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding, Vacuum, 207 (2023) 111552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111552>
- [7] Z. Taskan, E. Ozturk, S. Tezcan, H. Mindivan, Influence of plasma nitriding on tribological performance of HVOF sprayed AISI 316L and AISI 420 stainless steel coatings, Tribology and Materials, 3 (4) (2024) 187–196. DOI: <https://doi.org/10.46793/tribomat.2024.020>
- [8] C.A.K. Reddy, T. Srinivasan, B. Venkatesh, Effect of plasma nitriding on M50 NiL steel – A review, Materials Today: Proceedings, 52 (3) (2022) 1073–1077. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.494>
- [9] G. Wang, Y. Peng, Z. Zhu, X. Chang, C. Li, M. Imran, M.A. Wahab, Fretting wear behaviour of high strength alloy steel induced by plasma nitriding and post-oxidation, Tribology International, 196 (2024) 109732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109732>
- [10] A.A. Gukov, L.A. Khasanova, The increase of nitriding processes effectiveness, Civil Aviation High Technologies, 183 (2012) 28–33.



- [11] A.M. Shevchuk, D.A. Negrov, V.Iu. Putintsev, Vliianie azotirovaniia na strukturu i svoistva stalei [The influence of nitriding on the structure and properties of steels], Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniia: materialy V Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Engineering and technology of mechanical engineering: Proceedings of the V International Student Scientific and Practical Conference], (2016) 421–425.
- [12] E.V. Shehovtseva, Study of the microhardness ensuring the contact endurance of structural materials, Industrial laboratory. Diagnostics of materials, 90 (9) (2024) 48–53. DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-9-48-53>
- [13] K.V. Kuskov, K.V. Syzrantseva, Comparison of fatigue characteristics of samples of different geometry from steel 09Mn2S, Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science, 26 (2) (2024) 24–30. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9877/2024.2.03>
- [14] P.E. Antipov et al., Sravnitel'nyi analiz iznosostoikosti ionno-plazmennykh pokrytii tribologicheskogo naznacheniia [Comparative analysis of wear resistance of ion-plasma coatings for tribological purposes], Aktual'nye problemy nauki i tekhniki. 2024: materialy Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-prakticheskoi konferentsii [Current issues of science and technology. 2024: materials of the All-Russian (national) scientific and practical conference], (2024) 532.
- [15] S.V. Agafonov, V.A. Belomestnyh, Wear resistance tests of nitrided in an electrostatic field of steel 38H2MYUA, Vestnik IrGSHA, 84 (2018) 136–142.
- [16] V. Gahramanov, Nitrogening tool steels, The Scientific Heritage, 62 (2021) 36–41.
- [17] A.G. Akulichev, V.V. Trofimov, Ostatochnye napriazheniia v nitrotsementovannoi stali 20Kh3M-VF-sh [Residual stresses in nitrocarburized steel 20Kh3MVF-sh], Inzhenernyi vestnik Dona [Engineering journal of Don], 14 (4) (2010) 163–169.
- [18] A.A. Mitiaevel, S.B. Belikov, V.I. Povelo, Povyshenie kavitatsionnoi stoikosti vtorichnykh siluminov [Increasing the cavitation resistance of secondary silumins], Lit'e i metallurgiya [Foundry production and metallurgy], 43 (3) (2007) 94–96.
- [19] G.A. Webster, A.N. Ezeilo, Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, International Journal of Fatigue, 23 (1) (2001) 375–383. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00133-5)

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Ruslan V. KUZNETSOV** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

E-mail: Spaun1605@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5670-8784>

**Vasilii G. TEPLUKHIN** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

E-mail: cornfield@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0535-7899>

**Evgeniy O. OLKHOVICK** – Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping.

E-mail: olhovick@gmail.com

**Поступила: 13.06.2025; Одобрена: 02.07.2025; Принята: 04.07.2025.**

**Submitted: 13.06.2025; Approved: 02.07.2025; Accepted: 04.07.2025.**

Научная статья

УДК 669-1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31306>



А.М. Золотарев<sup>1</sup>, В.А. Нефёдова<sup>1</sup>✉, А.Л. Барабаш<sup>2</sup>, И.А. Полозов<sup>1</sup>, А.А. Попович<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, Россия

✉ nefedova1vika@gmail.com

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ СПЛАВА ВЖ159 С ДОБАВЛЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ TiB<sub>2</sub>. АНАЛИЗ ПОРИСТОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ

**Аннотация.** В данной работе исследовано влияние наночастиц диборида титана (TiB<sub>2</sub>) на свойства никелевого суперсплава ВЖ159, полученного методом селективного лазерного плавления (СЛП). Изучены плотность и микротвердость композитов с содержанием TiB<sub>2</sub> от 0 до 2% масс. при различных режимах СЛП с плотностью энергии 49,8–169,3 Дж/мм<sup>3</sup>. Методом гидростатического взвешивания получены образцы с плотностью более 99% от теоретической при оптимальных параметрах процесса. Установлено, что с увеличением содержания TiB<sub>2</sub> происходит смещение оптимальной плотности энергии в сторону более высоких значений: для чистого ВЖ159 – 83,3–86,8 Дж/мм<sup>3</sup>, для композита с 2% TiB<sub>2</sub> – более 130 Дж/мм<sup>3</sup>. Выявлено влияние концентрации наночастиц на механические свойства материала. Микротвердость образцов составила от 280–290 HV для чистого сплава до 320–348 HV для композита с 2% TiB<sub>2</sub>. Определено оптимальное содержание TiB<sub>2</sub> 1–1,5% при плотности энергии 110–140 Дж/мм<sup>3</sup>, обеспечивающее повышение микротвердости на 15–20%.

**Ключевые слова:** селективное лазерное плавление, никелевый суперсплав ВЖ159, наночастицы диборида титана, микротвердость, плотность энергии, аддитивное производство.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств» (Соглашение №23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>).

Для цитирования:

Золотарев А.М., Нефёдова В.А., Барабаш А.Л. и др. Исследование процесса селективного лазерного плавления для сплава ВЖ159 с добавлением наночастиц TiB<sub>2</sub>. Анализ пористости и микротвердости // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 86–97. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31306>



## Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31306>

A.M. Zolotarev<sup>1</sup>, V.A. Nefyodova<sup>1</sup>✉,  
A.L. Barabash<sup>2</sup>, I.A. Polozov<sup>1</sup>, A.A. Popovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Public Joint Stock Company "Gazprom", St. Petersburg, Russia

✉ nefedova1vika@gmail.com

## INVESTIGATION OF THE SELECTIVE LASER MELTING PROCESS FOR VZH159 ALLOY WITH TiB<sub>2</sub> NANOPARTICLE ADDITION. ANALYSIS OF POROSITY AND MICROHARDNESS

**Abstract.** This study investigates the effect of titanium diboride (TiB<sub>2</sub>) nanoparticles on the properties of nickel superalloy VZh159 fabricated by selective laser melting (SLM). The study examines the density and microhardness of composites containing 0 to 2 wt.% TiB<sub>2</sub> under various SLM processing modes with energy densities ranging from 49.8 to 169.3 J/mm<sup>3</sup>. Density measurements were conducted using hydrostatic weighing, achieving samples with density exceeding 99% of the theoretical value at optimal process parameters. The study reveals that increasing TiB<sub>2</sub> content shifts the optimal energy density toward higher values: for pure VZh159 it is 83.3–86.8 J/mm<sup>3</sup> and for composites with 1.5% and 2% TiB<sub>2</sub> it exceeds 130 J/mm<sup>3</sup>. The research demonstrates progressive microhardness enhancement with increasing TiB<sub>2</sub> concentration, from 280–290 HV for the pure alloy to 320–348 HV for 2% TiB<sub>2</sub> composite. The study determines the optimal TiB<sub>2</sub> content as 1–1.5 wt.% at energy density of 110–140 J/mm<sup>3</sup>, providing 15–20% microhardness improvement.

**Keywords:** selective laser melting, nickel superalloy VZh159, titanium diboride nanoparticles, microhardness, energy density, additive manufacturing.

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 "Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties". Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004>.

**Citation:**

Zolotarev A.M., Nefyodova V.A., Barabash A.L. et al., Investigation of the selective laser melting process for VZh159 alloy with TiB<sub>2</sub> nanoparticle addition. Analysis of porosity and microhardness, Global Energy, 31 (03) (2025) 86–97, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31306>

**Введение.** Аддитивное производство (АП) никелевых сплавов представляет собой новую технологию создания сложных деталей для аэрокосмической отрасли и энергетики [1]. Селективное лазерное плавление (СЛП) среди прочих методов АП обладает рядом преимуществ: свободой конструирования, экономичностью использования материалов и возможностью получения деталей, близких к финальной форме [2, 3].

Газотурбинные топливные форсунки являются сложными изделиями для изготовления ввиду наличия замысловатых внутренних охлаждающих каналов и жестких эксплуатационных режимов (температуры – до 1600°C, давления – более 30 бар). СЛП-технология дает возможность консолидировать множество элементов и формировать недостижимые ранее внутренние геометрии [4].

ВЖ159 является никелевым сплавом, упрочняемым твердым раствором, который широко применяется в газотурбостроении благодаря выдающейся жаропрочности, окалиностойкости и технологичности при сварке [5, 6]. Химический состав сплава с содержанием около 20% Cr, 9% Mo и 3,6% Nb гарантирует высокую коррозионную стойкость в агрессивных условиях [7].



Тем не менее СЛП-обработка никелевых суперсплавов сопряжена с рядом трудностей. Высокие скорости кристаллизации и значительные температурные градиенты формируют дендритные структуры. Послойное наращивание стимулирует эпигаксиальный рост, что ведет к образованию крупных столбчатых зерен с четко выраженной кристаллографической текстурой по направлению построения и анизотропией механических характеристик [8, 9]. Значительные температурные градиенты генерируют существенные остаточные напряжения до 500 МПа в готовых изделиях [10].

Недавние исследования показали, что добавление керамических наночастиц к металлическим порошкам может эффективно изменять поведение затвердевания и измельчать микроструктуры во время СЛП-обработки. Были исследованы различные наночастицы, включая TiC [11], SiC [12] и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [13]. Диборид титана (TiB<sub>2</sub>) привлек особое внимание благодаря своим свойствам: высокой температуре плавления (3225°C), низкой плотности (4,52 г/см<sup>3</sup>), высокой твердости (3400 HV), отличной химической стабильности и близкому соответствию решетки с никелевыми основами [14, 15].

В статье [16] зафиксировано заметное измельчение зерна в сплаве GH3230 при добавках TiB<sub>2</sub>, что позволяет снизить размер зерна с 50 мкм до 8 мкм при содержании 1 мас.% TiB<sub>2</sub>. В работе [17] авторы показали устранение кристаллизационных трещин в сплаве Inconel 939 при 2 об.% TiB<sub>2</sub>, при этом сохранив 13–15%-ное относительное удлинение при комнатной температуре. Интервал концентраций TiB<sub>2</sub> 0,5–2,0 мас.% определялся на основе имеющихся литературных данных по керамически-армированным суперсплавам.

В данной работе исследуется влияние содержания наночастиц TiB<sub>2</sub> на плотность и микротвердость сплава ВЖ159, синтезированного методом СЛП, а также устанавливается корреляция между режимами СЛП (плотностью энергии) и содержанием армирующей фазы.

### **Материалы, оборудование и методы исследования**

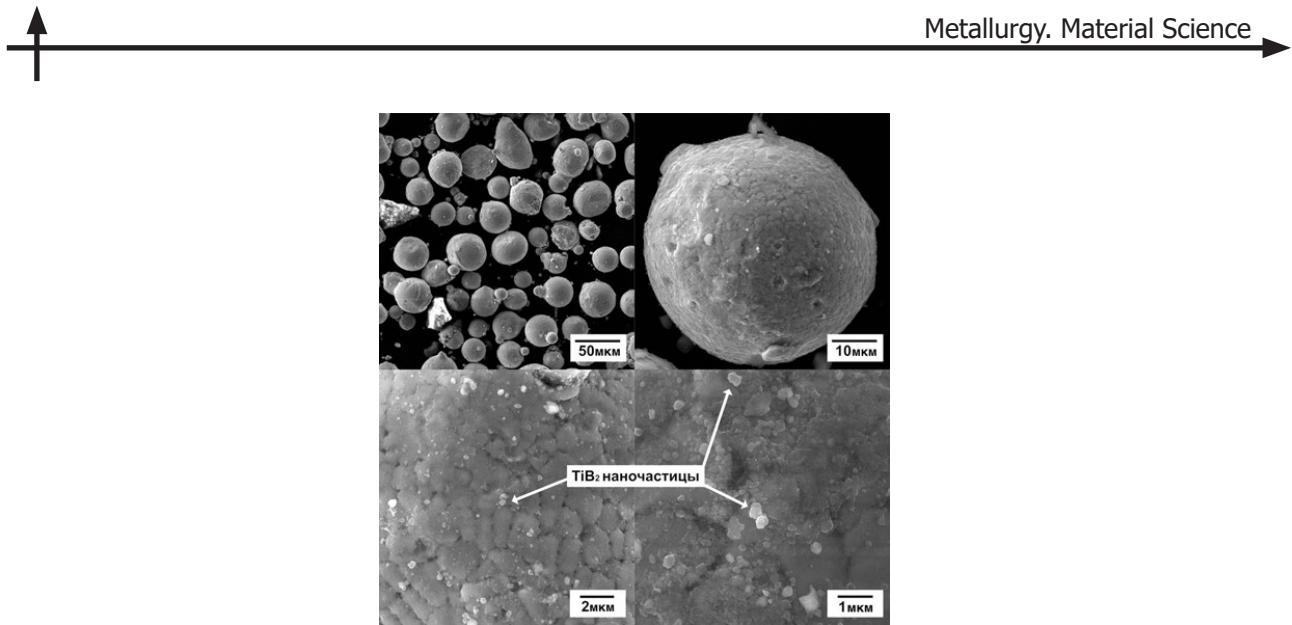
В работе использовался порошок жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 (ХН58МБЮ) производства ООО «СфераM» с размером частиц 15–63 мкм, полученный методом газовой атомизации. Химический состав сплава ВЖ159 представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Химический состав сплава ВЖ159 (ХН58МБЮ)  
Table 1  
Chemical composition of VZh159 alloy

Элемент	Ni	Cr	Mo	Al	Nb	W	Ti	Fe	C	Si	Mn	B
Содержание, % масс.	Основа	25,0–28,0	8,5–9,5	0,8–1,2	1,8–2,2	4,5–5,5	0,5–0,9	≤5,0	≤0,08	≤0,4	≤0,5	≤0,008

В качестве армирующих частиц использовался порошок TiB<sub>2</sub> со средним размером частиц 100–200 нм. Порошковые композиции готовились путем механического смешивания в шаровой мельнице в течение 8 часов при соотношении шары/порошок 10:1 со скоростью вращения 60 об/мин. Были подготовлены смеси с содержанием TiB<sub>2</sub> 0%, 0,5%, 1%, 1,5% и 2% масс. Выбор диапазона концентраций TiB<sub>2</sub> (0–2% масс.) обусловлен литературными данными о критическом снижении пластичности никелевых сплавов при содержании боридных фаз более 2–3%.

Образцы изготавливались на установке СЛП 3DLam MINI с иттербиевым волоконным лазером мощностью 200 Вт в защитной атмосфере аргона. Для каждого состава порошковой композиции было изготовлено по 20 кубических образцов размером 8×8×5 мм с различными режимами СЛП. Толщина слоя порошка составляла 40 мкм, диаметр пятна лазера – 70 мкм.

Рис. 1. СЭМ изображения порошка ВЖ159 с наночастицами TiB<sub>2</sub>Fig. 1. SEM images of VZh159 powder with TiB<sub>2</sub> nanoparticles

## Режимы СЛП

Таблица 2

## SLM modes

Table 2

№ режима	Мощность лазера, Вт	Скорость сканирования, мм/с	Толщина слоя, мкм	Шаг сканирования, мкм	Плотность энергии, Дж/мм <sup>3</sup>
1	205	640	40	120	66,73
2	280	500	40	120	116,67
3	280	700	40	120	83,33
4	165	690	40	120	49,82
5	245	690	40	120	73,97
6	250	600	40	120	86,81
7	220	750	40	120	61,11
8	200	500	40	120	83,33
9	270	650	40	120	86,54
10	280	600	40	120	97,22
11	200	400	40	120	104,17
12	240	460	40	120	108,7
13	220	400	40	120	114,58
14	220	380	40	120	120,61
15	280	460	40	120	126,81
16	240	380	40	120	131,58
17	240	360	40	120	138,89
18	280	400	40	120	145,83
19	240	320	40	120	156,25
20	260	320	40	120	169,27



Варьировались мощность лазера и скорость сканирования. Образцы синтезировались при разной плотности энергии в диапазоне 49,8–169,3 Дж/мм<sup>3</sup>. Стратегия сканирования – шахматная с поворотом на 67° между слоями.

Плотность образцов измерялась методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139-69. Измерения проводились с использованием аналитических весов с погрешностью не более 0,001 г. В качестве иммерсионной жидкости использовалась дистиллированная вода с добавлением смачивающего компонента.

Микротвердость образцов измерялась на твердомере по шкале Виккерса (HV) при нагрузке 100 г и времени выдержки 10 с согласно ГОСТ 9450-76. Для каждого образца проводилось не менее 10 измерений с последующим вычислением среднего значения и стандартного отклонения.

## Результаты

### *Влияние режимов СЛП и содержания TiB<sub>2</sub> на плотность образцов*

Для чистого сплава ВЖ159 (без добавок TiB<sub>2</sub>) максимальная плотность достигается при плотности энергии 83,3–86,8 Дж/мм<sup>3</sup>, составляя 8,18 г/см<sup>3</sup>. С увеличением содержания наночастиц TiB<sub>2</sub> наблюдается смещение плотности энергии, оптимальной с точки зрения плотности материала, в сторону более высоких значений. Для композита с 0,5% TiB<sub>2</sub> плотность энергии, оптимальная с точки зрения плотности материала, составляет 83,3–97,2 Дж/мм<sup>3</sup>, для композита с 1% TiB<sub>2</sub> – 108,7–126,8 Дж/мм<sup>3</sup>, а для композитов с 1,5% и 2% TiB<sub>2</sub> – более 130 Дж/мм<sup>3</sup>.

Необходимость увеличения плотности энергии с ростом содержания TiB<sub>2</sub> обусловлена некоторыми факторами:

- 1) изменением теплофизических свойств порошковой смеси – наночастицы TiB<sub>2</sub> имеют более высокую теплопроводность (60–120 Вт/(м·К)) по сравнению с матричным сплавом, что приводит к более интенсивному отводу тепла из зоны расплава;
- 2) энергетическими затратами на химические реакции трансформации TiB<sub>2</sub> в бориды переходных металлов;
- 3) изменением вязкости расплава – наночастицы и продукты их трансформации повышают вязкость, требуя большей энергии для обеспечения адекватной смачиваемости и формирования плотных треков.

Данные о плотности образцов при различных режимах СЛП сведены в табл. 3. Для сплава ВЖ159 без добавок TiB<sub>2</sub> плотность составляет 99,7% от теоретической, что указывает на высокое качество процесса СЛП. С увеличением содержания TiB<sub>2</sub> до 1,5% максимальная достигаемая плотность несколько снижается до 99,2–99,4%, а при содержании 2% TiB<sub>2</sub> – до 99,0–99,2%.

### *Влияние режимов СЛП и содержания TiB<sub>2</sub> на микротвердость образцов*

Анализ зависимости микротвердости от содержания TiB<sub>2</sub> показал прогрессивное увеличение значений микротвердости с ростом концентрации наночастиц (рис. 2). Для чистого ВЖ159 средняя микротвердость составляет 280–290 HV, в то время как для композита с 2% TiB<sub>2</sub> достигает 320–348 HV при оптимальных режимах СЛП. Особенно заметный рост микротвердости наблюдается при переходе от 0% к 1% TiB<sub>2</sub>, где прирост составляет в среднем 15–20%.

Данные по микротвердости образцов при различных содержаниях TiB<sub>2</sub> представлены в табл. 4. Максимальная микротвердость для композита с 2% TiB<sub>2</sub> достигается при плотности энергии 97,2 Дж/мм<sup>3</sup> и составляет 348,7 HV.

При исследовании влияния параметров сканирования для композита ВЖ159 с 2% TiB<sub>2</sub> установлено, что наименьшая пористость достигается при средних значениях скорости сканирования и мощности лазера (рис. 3). Как слишком низкие, так и слишком высокие значения этих параметров приводят к увеличению пористости. Это объясняется тем, что при низких значениях недостаточно энергии для полного расплавления частиц, а при слишком высоких возникает перегрев материала, способствующий образованию пор.

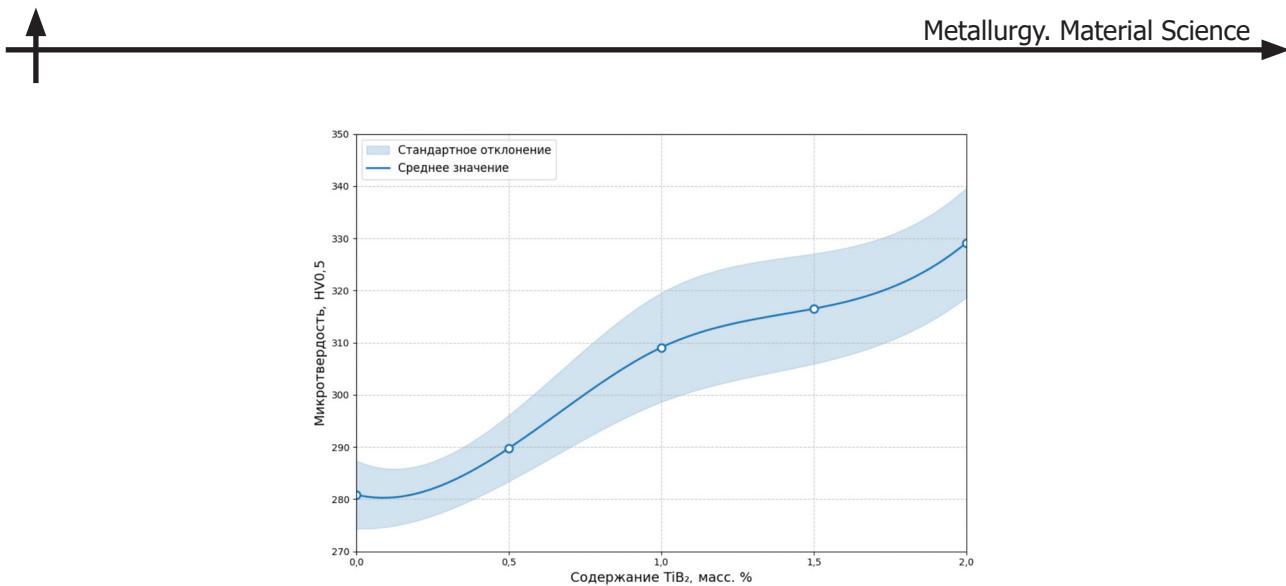
Рис. 2. Зависимость микротвердости образцов от различного содержания TiB<sub>2</sub>Fig. 2. Dependence of microhardness of samples on different TiB<sub>2</sub> content

Таблица 3

**Плотность образцов (г/см<sup>3</sup>) при режимах СЛП, оптимальных с точки зрения плотности материала**

Table 3

**Sample density (g/cm<sup>3</sup>) under SLM conditions optimal in terms of material density**

№ режима	Плотность энергии (Дж/мм <sup>3</sup> )	Плотность (г/см <sup>3</sup> )			
		0% TiB <sub>2</sub>	0,5% TiB <sub>2</sub>	1% TiB <sub>2</sub>	1,5% TiB <sub>2</sub>
3	83,3	8,18	8,16	8,12	8,11
7	61,1	8,18	8,08	8,09	7,99
9	86,5	8,16	8,16	8,11	8,11
17	138,9	8,7	—	8,16	8,10
19	156,3	8,14	—	8,15	8,08

Таблица 4

**Максимальные значения микротвердости образцов при различном содержании TiB<sub>2</sub> и различных режимах СЛП**

Table 4

**Maximum values of microhardness of samples with different TiB<sub>2</sub> content and different SLM modes**

№ режима	Плотность энергии (Дж/мм <sup>3</sup> )	Микротвердость				
		0% TiB <sub>2</sub>	0,5% TiB <sub>2</sub>	1% TiB <sub>2</sub>	1,5% TiB <sub>2</sub>	2% TiB <sub>2</sub>
3	83,3	289,12	290,42	334,84	317,2	320,92
5	74,0	—	297,16	298,84	330,4	324,94
10	97,2	277,0	—	298,52	304,8	348,7
15	126,8	292,2	—	—	—	—

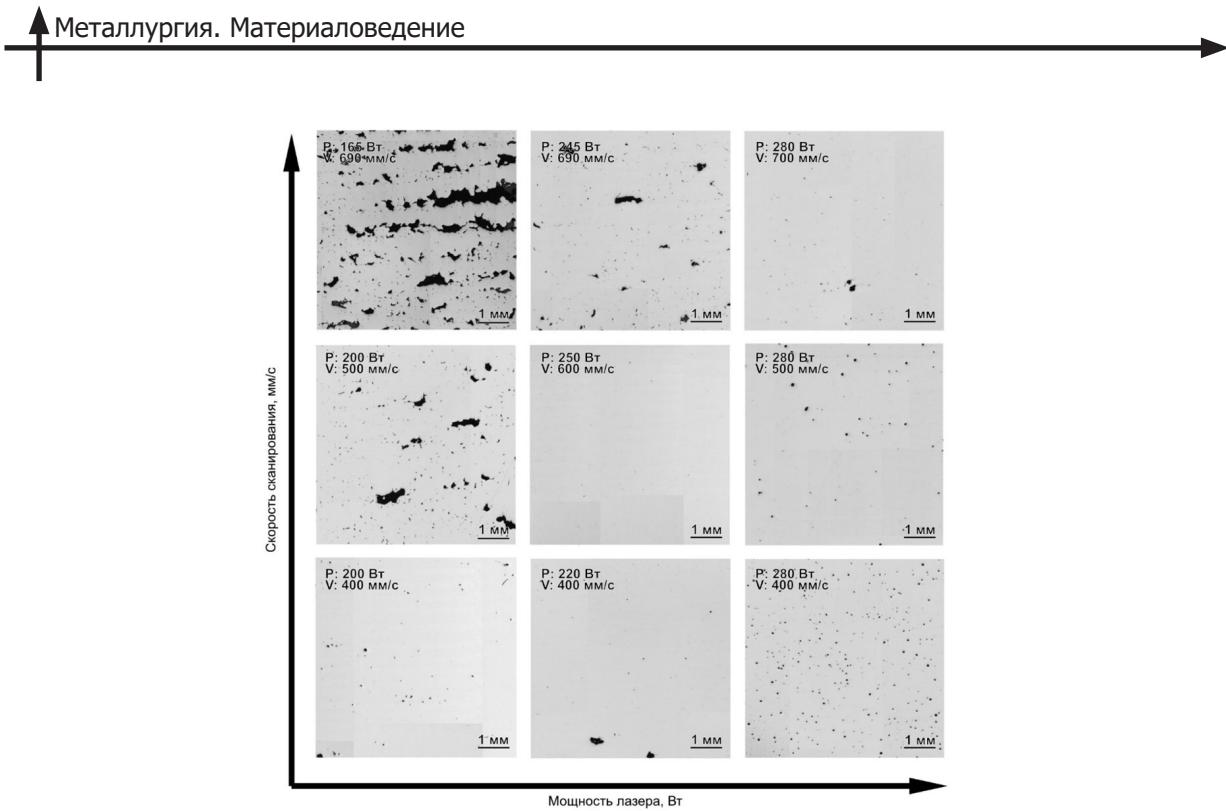


Рис. 3. Влияние скорости сканирования и мощности лазера на пористость композита ВЖ159+2% TiB<sub>2</sub>

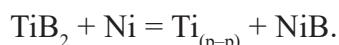
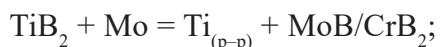
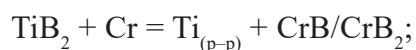
Fig. 3. Effect of scanning speed and laser power on the porosity of the composite VZh159+2% TiB<sub>2</sub>

### Обсуждение

Полученные результаты показывают, что введение наночастиц TiB<sub>2</sub> в сплав ВЖ159 существенно влияет на процесс СЛП и свойства получаемых композитов. С увеличением содержания TiB<sub>2</sub> наблюдается смещение оптимальной плотности энергии в сторону более высоких значений, что связано с изменением теплофизических свойств порошковой композиции.

Диборид титана имеет значительно более высокую температуру плавления (3225°C) по сравнению с матричным сплавом ВЖ159 (~1350°C), что требует увеличения энергии для достижения полного расплавления всех компонентов.

Важно отметить, что в процессе СЛП происходит не простое механическое внедрение частиц TiB<sub>2</sub> в матрицу, а их химическая трансформация. При температурах ванны расплава (1400–1600°C) наночастицы TiB<sub>2</sub> взаимодействуют с элементами матричного сплава ВЖ159:



В результате формируются комплексные бориды (Cr, Mo, Ni)B, которые имеют размер 100–500 нм и преимущественно располагаются по границам дендритов/зерен. Титан при этом переходит в твердый раствор, дополнительно упрочняя матрицу. Данный механизм объясняет эффективность упрочнения даже при малых добавках TiB<sub>2</sub> и необходимость повышения энергии для полного протекания реакций трансформации.

Повышение микротвердости композитов с увеличением содержания TiB<sub>2</sub> объясняется несколькими механизмами упрочнения:

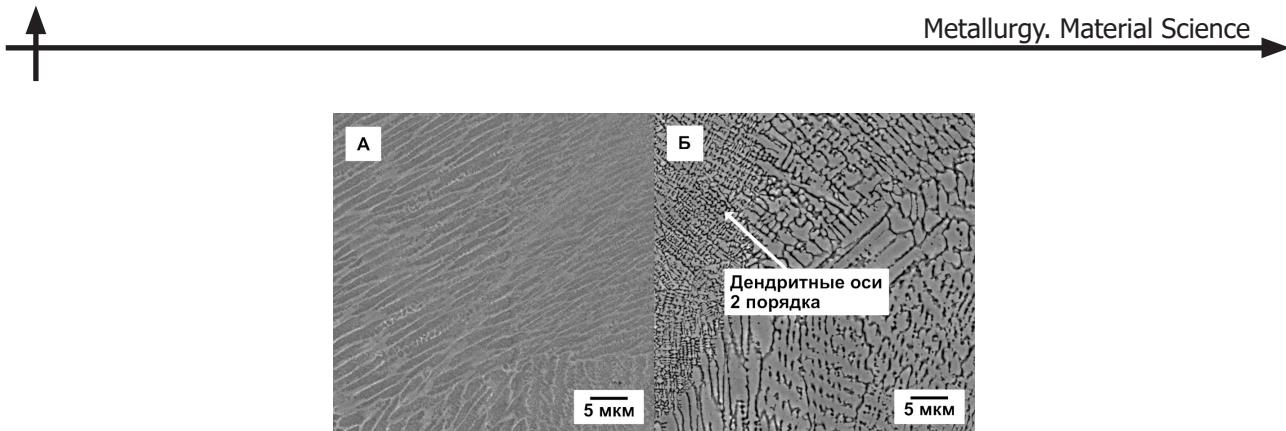


Рис. 4. Изменение микроструктуры при добавлении наночастиц  $\text{TiB}_2$ : а) 0%, б) 2%

Fig. 4. Change in microstructure upon addition of  $\text{TiB}_2$  nanoparticles: a) 0%, b) 2%

1) Дисперсионное упрочнение за счет формирующихся *in-situ* боридов ( $\text{Cr}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ni}$ )В размером 100–500 нм, создающих барьеры для движения дислокаций, что приводит к повышению прочности согласно механизму Орована.

2) Измельчение зеренной структуры матрицы благодаря эффекту гетерогенного зародышебразования на частицах  $\text{TiB}_2$ .

3) Повышение объемной доли границ раздела между матрицей и упрочняющей фазой.

4) Высокая термическая стабильность боридных фаз, что препятствует рекристаллизации и сохраняет мелкозернистую структуру при высоких температурах эксплуатации.

При этом заметный рост микротвердости наблюдается уже при добавлении 0,5–1%  $\text{TiB}_2$ , что указывает на высокую эффективность данного типа упрочнения. Дальнейшее увеличение содержания  $\text{TiB}_2$  до 2% приводит к менее интенсивному росту микротвердости, что может быть связано с агломерацией наночастиц и снижением однородности их распределения в матрице.

Исследование пористости композитов показало, что при режимах СЛП, оптимальных с точки зрения плотности материала, возможно получение материала с плотностью более 99% от теоретической даже при содержании  $\text{TiB}_2$  до 2%. Однако с увеличением содержания наночастиц диапазон оптимальных режимов СЛП сужается, что требует более тщательного подбора параметров процесса.

На основании проведенных исследований установлено, что содержанием наночастиц  $\text{TiB}_2$ , оптимальным с точки зрения комплекса свойств, в сплаве ВЖ159, полученном методом СЛП, является 1–1,5%. Данный состав обеспечивает высокую плотность материала (более 99,2% от теоретической) и повышение микротвердости на 15–20% по сравнению с исходным сплавом.

### Заключение

- Установлено влияние содержания наночастиц  $\text{TiB}_2$  (0%, 0,5%, 1%, 1,5% и 2% масс.) на плотность и микротвердость сплава ВЖ159, полученного методом СЛП.

- Показано, что с увеличением содержания наночастиц  $\text{TiB}_2$  наблюдается смещение плотности энергии, оптимальной с точки зрения минимизации пористости, в сторону более высоких значений: для чистого сплава ВЖ159 – 83,3–86,8 Дж/мм<sup>3</sup>, для композита с 0,5%  $\text{TiB}_2$  – 83,3–97,2 Дж/мм<sup>3</sup>, для композита с 1%  $\text{TiB}_2$  – 108,7–126,8 Дж/мм<sup>3</sup>, а для композитов с 1,5% и 2%  $\text{TiB}_2$  – более 130 Дж/мм<sup>3</sup>.

- Выявлено прогрессивное увеличение микротвердости с ростом концентрации наночастиц  $\text{TiB}_2$ : для чистого ВЖ159 – 280–290 HV, для композита с 2%  $\text{TiB}_2$  – 320–348 HV.

- Определено оптимальное содержание наночастиц  $\text{TiB}_2$  в сплаве ВЖ159 – 1–1,5% при плотности энергии 110–140 Дж/мм<sup>3</sup>, обеспечивающее высокую плотность материала и повышение микротвердости на 15–20%.



5. Установлена необходимость увеличения плотности энергии с ростом содержания TiB<sub>2</sub> для достижения максимальной плотности и микротвердости материала, что обусловлено более высокой температурой плавления TiB<sub>2</sub> по сравнению с матричным сплавом и изменением теплофизических свойств композита.

Результаты исследования показывают перспективность применения композитов на основе сплава ВЖ159 с добавлением наночастиц TiB<sub>2</sub> для изготовления деталей газотурбинных двигателей методом селективного лазерного плавления с улучшенными механическими свойствами, в частности, повышенной микротвердостью и износостойкостью.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Srinivasan D., Ananth K. Recent advances in alloy development for metal additive manufacturing in gas turbine/aerospace applications: A review, Journal of the Indian Institute of Science, 102 (2022) 311–349. DOI: 10.1007/s41745-022-00290-4
- [2] Gao B., Zhao H., Peng L., Sun Z. A review of research progress in selective laser melting (SLM), Micromachines, 14 (1) (2023) 57. DOI: 10.3390/mi14010057
- [3] Soni N., Renna G., Leo P. Advancements in metal processing additive technologies: Selective laser melting (SLM), Metals, 14 (9) (2024) 1081. DOI: 10.3390/met14091081
- [4] Han P. Additive design and manufacturing of jet engine parts, Engineering, 3 (5) (2017) 648–652. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.017
- [5] Евгенов А.Г., Горбовец М.А., Прагер С.М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2016. Т. 43, № S1. С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15
- [6] Kyarimov R.R., Statnik E.S., Sadykova Iu.A., Frantsuzov A.A., Salimon A.I., Korsunsky A.M. Factorial-experimental investigation of LPBF regimes for VZh159 nickel superalloy grain structure and structural strength optimization, Frontier in Materials, 11 (2024) 1470651. DOI: 10.3389/fmats.2024.1470651
- [7] Солнцев С.С., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьев Г.А. Жаростойкое покрытие для защиты высокопрочных сложнолегированных никелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии // Труды ВИАМ. 2014. № 6. Ст. 4. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-4-4
- [8] Calandri M., Yin S., Aldwell B., Calignano F., Lupoi R., Ugues D. Texture and microstructural features at different length scales in Inconel 718 produced by selective laser melting, Materials, 12 (8) (2019) 1293. DOI: 10.3390/ma12081293
- [9] Chittewar S.L., Patil N.G. Surface integrity of conventional and additively manufactured nickel superalloys: A review, Materials Today: Proceedings, 44 (1) (2021) 701–708. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.614
- [10] Mercelis P., Kruth J.-P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, 12 (5) (2006) 254–265. DOI: 10.1108/13552540610707013
- [11] Zhang H., Wang W.-X., Chang F., Li C.-L., Shu S.-L., Wang Z.-F., Han X., Zou Q., Qiu F., Jiang Q. Microstructure manipulation and strengthening mechanisms of 40Cr steel via trace TiC nanoparticles, Materials Science & Engineering: A, 822 (2021) 141693. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141693
- [12] Ning J., Lan Q., Zhu L., Xu L., Yang Z., Xu P., Xue P., Xin B. Microstructure and mechanical properties of SiC-reinforced Inconel 718 composites fabricated by laser cladding, Surface and Coatings Technology, 463 (2023) 129514. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129514
- [13] Li M., Wang L., Yang H., Zhang S., Lin X., Huang W. Microstructure and mechanical properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> strengthened Inconel 625 alloy fabricated by selective laser melting, Materials Science and Engineering: A, 854 (2022) 143813. DOI: 10.1016/j.msea.2022.143813



- [14] **Zhang B., Bi G., Nai S., Sun C.-n., Wei J.** Microhardness and microstructure evolution of TiB<sub>2</sub> reinforced Inconel 625/TiB<sub>2</sub> composite produced by selective laser melting, *Optics & Laser Technology*, 80 (2016) 186–195. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.01.010
- [15] **Basu B., Raju G.B., Suri A.K.** Processing and properties of monolithic TiB<sub>2</sub> based materials, *International Materials Reviews*, 51 (6) (2006) 352–374. DOI: 10.1179/174328006X102529
- [16] **Zhang Z., Han Q., Liu Z., Gao J., Wang L., Liu H., Wang R., Ma T., Gao Z.** Combined effects of heat treatment and TiB<sub>2</sub> content on the high-temperature tensile performance of TiB<sub>2</sub>-modified Ni-based GH3230 alloy processed by laser powder bed fusion, *Materials Science and Engineering: A*, 861 (2022) 144379. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144379
- [17] **Bae J.-S., Tekoglu E., Alrizqi M., O'Brien A.D., Liu J., Biggs K., Kim S.Y., Penn A., Sulak I., Chen W., So K.P., Hart A.J., Sim G.D., Li J.** Additive manufacturing of strong and ductile In939+TiB<sub>2</sub> by laser powder bed fusion, *Materials Science and Engineering: A*, 939 (2025) 148446. DOI: 10.1016/j.msea.2025.148446

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЗОЛОТАРЕВ Антон Михайлович** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.  
E-mail: zolotarev\_am@spbstu.ru

**НЕФЁДОВА Виктория Александровна** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.  
E-mail: nefedova1vika@gmail.com

**БАРАБАШ Алексей Леонидович** – главный специалист, ПАО «Газпром», без степени.  
E-mail: Barabash.alexey@gmail.com

**ПОЛОЗОВ Игорь Анатольевич** – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: igor.polozov@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** – директор ИММиТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

## REFERENCES

- [1] **D. Srinivasan, K. Ananth**, Recent advances in alloy development for metal additive manufacturing in gas turbine/aerospace applications: A review, *Journal of the Indian Institute of Science*, 102 (2022) 311–349. DOI: 10.1007/s41745-022-00290-4
- [2] **B. Gao, H. Zhao, L. Peng, Z. Sun**, A review of research progress in selective laser melting (SLM), *Micromachines*, 14 (1) (2023) 57. DOI: 10.3390/mi14010057
- [3] **N. Soni, G. Renna, P. Leo**, Advancements in metal processing additive technologies: Selective laser melting (SLM), *Metals*, 14 (9) (2024) 1081. DOI: 10.3390/met14091081
- [4] **P. Han**, Additive design and manufacturing of jet engine parts, *Engineering*, 3 (5) (2017) 648–652. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.017



- [5] A.G. Evgenov, M.A. Gorbovets, S.M. Prager, Struktura i mekhanicheskie svoistva zharoprochnykh splavov VZH159 i EP648, poluchennykh metodom selektivnogo lazernogo splavleniya [Structure and mechanical properties of heat-resistant alloys VZh159 and EP648 obtained by selective laser melting], Aviation Materials and Technologies, 43 (S1) (2016) 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15
- [6] R.R. Kyarimov, E.S. Statnik, Iu.A. Sadykova, A.A. Frantsuzov, A.I. Salimon, A.M. Korsunsky, Factorial-experimental investigation of LPBF regimes for VZh159 nickel superalloy grain structure and structural strength optimization, Frontier in Materials, 11 (2024) 1470651. DOI: 10.3389/fmats.2024.1470651
- [7] S.S. Solncev, V.V. Shvagireva, N.V. Isaeva, G.A. Solovyova, High temperature coating for protection of high-strength complex alloyed of nickel alloys of high-temperature gas corrosion, Proceedings of VIAM, 6 (2014) 4. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-4-4
- [8] M. Calandri, S. Yin, B. Aldwell, F. Calignano, R. Lupoi, D. Uguen, Texture and microstructural features at different length scales in Inconel 718 produced by selective laser melting, Materials, 12 (8) (2019) 1293. DOI: 10.3390/ma12081293
- [9] S.L. Chittewar, N.G. Patil, Surface integrity of conventional and additively manufactured nickel superalloys: A review, Materials Today: Proceedings, 44 (1) (2021) 701–708. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.614
- [10] P. Mercelis, J.-P. Kruth, Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, 12 (5) (2006) 254–265. DOI: 10.1108/13552540610707013
- [11] H. Zhang, W.-X. Wang, F. Chang, C.-L. Li, S.-L. Shu, Z.-F. Wang, X. Han, Q. Zou, F. Qiu, Q. Jiang, Microstructure manipulation and strengthening mechanisms of 40Cr steel via trace TiC nanoparticles, Materials Science & Engineering: A, 822 (2021) 141693. DOI: 10.1016/j.msea.2021.141693
- [12] J. Ning, Q. Lan, L. Zhu, L. Xu, Z. Yang, P. Xu, P. Xue, B. Xin, Microstructure and mechanical properties of SiC-reinforced Inconel 718 composites fabricated by laser cladding, Surface and Coatings Technology, 463 (2023) 129514. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129514
- [13] M. Li, L. Wang, H. Yang, S. Zhang, X. Lin, W. Huang, Microstructure and mechanical properties of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  strengthened Inconel 625 alloy fabricated by selective laser melting, Materials Science and Engineering: A, 854 (2022) 143813. DOI: 10.1016/j.msea.2022.143813
- [14] B. Zhang, G. Bi, S. Nai, C.-n. Sun, J. Wei, Microhardness and microstructure evolution of  $\text{TiB}_2$  reinforced Inconel 625/ $\text{TiB}_2$  composite produced by selective laser melting, Optics & Laser Technology, 80 (2016) 186–195. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.01.010
- [15] B. Basu, G.B. Raju, A.K. Suri, Processing and properties of monolithic  $\text{TiB}_2$  based materials, International Materials Reviews, 51 (6) (2006) 352–374. DOI: 10.1179/174328006X102529
- [16] Z. Zhang, Q. Han, Z. Liu, J. Gao, L. Wang, H. Liu, R. Wang, T. Ma, Z. Gao, Combined effects of heat treatment and  $\text{TiB}_2$  content on the high-temperature tensile performance of  $\text{TiB}_2$ -modified Ni-based GH3230 alloy processed by laser powder bed fusion, Materials Science and Engineering: A, 861 (2022) 144379. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144379
- [17] J.-S. Bae, E. Tekoglu, M. Alrizqi, A.D. O'Brien, J. Liu, K. Biggs, S.Y. Kim, A. Penn, I. Sulak, W. Chen, K.P. So, A.J. Hart, G.D. Sim, J. Li, Additive manufacturing of strong and ductile In939+ $\text{TiB}_2$  by laser powder bed fusion, Materials Science and Engineering: A, 939 (2025) 148446. DOI: 10.1016/j.msea.2025.148446

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Anton M. ZOLOTAREV** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: zolotarev\_am@spbstu.ru

**Victoria A. NEFYODOVA** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: nefedova1vika@gmail.com

**Aleksei L. BARABASH** – *Public Joint Stock Company “Gazprom”.*  
E-mail: Barabash.alexey@gmail.com

**Igor A. POLOZOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: igor.polozov@gmail.com  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5380-3072>

**Anatoliy A. POPOVICH** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

**Поступила: 18.07.2025; Одобрена: 11.08.2025; Принята: 10.09.2025.**  
**Submitted: 18.07.2025; Approved: 11.08.2025; Accepted: 10.09.2025.**

Научная статья

УДК 621.763

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31307>



А.И. Зайцев  , А.В. Сотов, А.Э. Абдрахманова, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

 [zaytsev.alexander2011@yandex.ru](mailto:zaytsev.alexander2011@yandex.ru)

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИМЕР-КЕРАМИЧЕСКИХ И КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИЛИКАТА ЦИРКОНИЯ ( $ZrSiO_4$ ) МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ ФИЛАМЕНТА (FDM-ТЕХНОЛОГИЯ)

**Аннотация.** На сегодняшний день аддитивные технологии открывают широкие возможности для создания функциональных материалов различного применения. Одним из актуальных направлений исследований является создание полимер-керамических композитов методом послойного наплавления филамента (FDM-технология). Такой подход совмещает преимущества 3D-печати и уникальные свойства композиционных материалов. В представленной работе проведено исследование полимер-керамического композиционного материала (ПККМ) на основе силиката циркония ( $ZrSiO_4$ ), полученного FDM-печатью. Для исследования свойств и структуры материала применялись методы оптической и электронной микроскопии, ДСК и ТГА анализы. Механические испытания включали определение ударной вязкости на маятниковом копре и измерение поверхностной твердости по Шору D. В ходе анализа результатов установлено увеличение ударной вязкости по сравнению с чистым PLA более чем на 30%. Продемонстрирована возможность получения керамических изделий путем термического удаления полимерного связующего и спекания керамических частиц. Результаты показывают перспективы использования FDM-технологии для изготовления функциональных изделий из полимер-керамических материалов с заданными свойствами.

**Ключевые слова:** аддитивное производство, полимер-керамический материал, FDM-технология, удаление связующего, спекание керамики.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Санкт-Петербургского научного фонда (Договор №23-РБ-0939).

**Для цитирования:**

Зайцев А.И., Сотов А.В., Абдрахманова А.Э., Попович А.А. Получение полимер-керамических и керамических материалов на основе силиката циркония ( $ZrSiO_4$ ) методом послойного наплавления филамента (FDM-технология) // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 98–106. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31307>



*A.I. Zaytsev<sup>✉</sup>, A.V. Sotov, A.E. Abdurakhmanova, A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>✉</sup> zaytsev.alexander2011@yandex.ru

## **PRODUCTION OF POLYMER-CERAMIC AND CERAMIC MATERIALS BASED ON ZIRCONIUM SILICATE ( $\text{ZrSiO}_4$ ) USING THE FUSED DEPOSITION MODELING (FDM-TECHNOLOGY)**

*Abstract.* To date, additive technologies offer wide opportunities for creating functional materials for various applications. One of the most relevant research areas is the development of polymer-ceramic composites using the fused deposition modeling (FDM) method. This approach combines the advantages of 3D printing with the unique properties of composite materials. The article presents a study of a polymer-ceramic composite material (PCCM) based on zirconium silicate ( $\text{ZrSiO}_4$ ) produced by FDM printing. Optical and electron microscopy, DSC and TGA analysis were used to study the properties and structure of the material. Mechanical testing included the determination of the impact strength using a pendulum impact tester and the measurement of the surface hardness using the Shore D scale. The analysis of the results showed an increase in impact strength of more than 30% compared to pure PLA. The feasibility of producing ceramic components through the thermal removal of the polymer binder and sintering of ceramic particles was demonstrated. The results indicate the promising potential of FDM technology for manufacturing functional products from polymer-ceramic materials with specified properties.

*Keywords:* additive manufacturing, polymer-ceramic material, FDM, debinding, sintering.

*Acknowledgements:* The research was supported by the St. Petersburg Science Foundation grant No. 23-RB-0939.

*Citation:*

Zaytsev A.I., Sotov A.V., Abdurakhmanova A.E., Popovich A.A., Production of polymer-ceramic and ceramic materials based on zirconium silicate ( $\text{ZrSiO}_4$ ) using the fused deposition modeling (FDM-technology), Global Energy, 31 (03) (2025) 98–106, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31307>

**Введение.** Технологии аддитивного производства (АП) активно внедряются в различные отрасли – от машиностроения и энергетики до радиотехники и аэрокосмического строения. Принцип построения изделий слой за слоем обладает рядом преимуществ в сравнении с традиционными подходами. В частности, АП позволяет создавать изделия со сложной геометрией при сокращении производственных отходов [1–3].

Среди семи общепринятых методов АП наиболее распространенным является процесс послойного наплавления филамента [4]. Сущность технологии FDM-печати заключается в нагреве термопластичного материала до вязкотекучего состояния и выборочном нанесении полимера в соответствии с 3D-моделью. Данная технология зарекомендовала себя как доступный аналог традиционным процессам для создания функциональных изделий. На сегодняшний день существует большое количество материалов для FDM-печати, которые подбираются в зависимости от требований к будущим изделиям. Наиболее распространенными являются полимолочная кислота (PLA), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтилентерефталатгликоль (PETG), полимерные композиционные материалы и др. [5]. Одним из перспективных, но малоизученных направлений является создание и исследование полимеров, наполненных керамическими и металлическими частицами [6]. В научных работах большее внимание уделяется



изучению полимер-металлических материалов, проводятся физико-механические испытания, исследуется структура и возможность получения металлических изделий путем проведения постобработки [7, 8]. Однако полимер-керамические материалы также представляют большой интерес за счет уникальных свойств керамики и широкого спектра доступных на сегодняшний день полимерных материалов. Это является катализатором развития области получения функциональных изделий из керамонаполненных филаментов [9–11].

В настоящей работе проведены исследования свойств полимер-керамического композиционного материала (ПККМ) на основе силиката циркония ( $\text{ZrSiO}_4$ ), полученного методом FDM-печати. Исследована возможность изготовления керамического материала путем термического удаления полимера и спекания керамических частиц.

### Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала использовался коммерчески доступный филамент диаметром 1,75 мм на основе PLA, наполненного силикатом циркония ( $\text{ZrSiO}_4$ ) от компании Virtual Foundry (США). Силикат циркония обладает уникальными тепловыми, механическими и диэлектрическими свойствами [12, 13]. ПККМ поставляется в катушках увеличенного диаметра, что снижает риск обрыва филамента в процессе хранения и 3D-печати. Такая мера обусловлена высокой долей керамического наполнителя (64–72 масс. %), которая повышает хрупкость материала. Высокое содержание керамики обеспечивает возможность получения керамических изделий путем проведения дополнительной термической обработки<sup>1</sup>. Для исследования влияния керамических частиц на механические свойства материала был использован чистый PLA от компании U3print (Россия).

Исследование полимер-керамического материала проводилось с использованием оптического микроскопа Leica DMi8 (Германия), сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 (Чехия), дифференциального сканирующего калориметра Netzsch DSC 404 F3 (Германия) и термогравиметрического анализатора SETSYS Evolution 16 (Франция).

Изготовление образцов осуществлялось методом FDM-печати с использованием настольного 3D-принтера Anycubic Kobra 3 Combo (Китай). Основным требованием к оборудованию являлось наличие системы прямой подачи филамента для обеспечения минимального расстояния между механизмом податчика и соплом для печати. Такая компоновка наиболее предпочтительна при работе с композиционными и хрупкими материалами, склонными к образованию надломов и дефектов в процессе печати.

Ударные испытания полученных образцов проводились в соответствии с ГОСТ 4647-2015 на маятниковом копре Zwick Roell RKP-450 (Германия). Поверхностная твердость материала после 3D-печати была измерена на твердомере со шкалой Шора D согласно ГОСТ 24621-91. Для вычисления плотности ПККМ использовался метод гидростатического взвешивания. Измерения проводились на аналитических весах GR-202, как описано в ГОСТ 3 57713-207.

При работе с высоконаполненными полимерами после 3D-печати получают так называемую «зеленую» модель, из которой впоследствии возможно получение керамического изделия путем соответствующей постобработки. Проведение термической обработки полимер-керамических образцов для исследования возможности получения керамических изделий осуществлялось в вакуумной печи Siomm (Китай) с возможностью нагрева до 1700°C.

### Результаты и обсуждение

Первый этап работы заключался в анализе исходного материала. Сечение филамента имеет форму окружности и состоит из керамических частиц различной формы, содержащихся в полимерной матрице. Для определения основных температурных переходов был проведен ДСК

<sup>1</sup> The Virtual Foundry – SDS – Zirconium Silicate 24-01. Режим доступа: <https://thevirtualfoundry.com/wp-content/uploads/2025/04/The-Virtual-Foundry-SDS-Zirconium-Silicate-24-01.pdf> (дата обращения: 15.08.2025).



анализ (рис. 3). Пик температуры стеклования составил 62,5°C, а пик температуры плавления – 170°C. Полученные данные учитывались при подборе температурных параметров 3D-печати и режимов термической постобработки.

Следующий этап заключался в отработке параметров FDM-печати. В соответствии с рекомендациями производителя для печати образцов было использовано сопло диаметром 0,6 мм. Процесс отработки режимов для достижения наилучших результатов включал настройку таких параметров, как температура экструзии и температура печатной платформы, скорость печати, высота и ширина трека, а также коэффициент подачи материала (табл. 1).

Таблица 1  
Параметры FDM-печати ПККМ  
Table 1  
FDM-printing parameters of PCCM

Температура экструзии, °C	Температура платформы, °C	Коэффициент подачи, %	Скорость печати, мм/с	Высота слоя, мм	Ширина трека, мм
210	55	1,3	20	0,2	0,6

Результаты исследования структуры «зеленой» модели, напечатанной с использованием оптимизированных параметров, показали широкое распределение керамических частиц по размеру (рис. 1). Преимущественно частицы имеют оскольчатую форму, что характерно для порошка, полученного механическим способом. Структура заполнения без ярко выраженных треков также может свидетельствовать о прочных межслойных связях ввиду отсутствия пор непосредственно между проходами. Средняя плотность ПККМ при этом составила 2,4 г/см<sup>3</sup>.

Исследование механических свойств продемонстрировало увеличение ударных характеристик ПККМ и незначительное влияние наполнителя на поверхностную твердость образцов. На рис. 2 представлен 3D-печатный полимер-керамический образец до испытаний на удар и образец после удара. В табл. 2 приведены полученные в ходе механических испытаний значения для ПККМ и PLA. Из результатов испытаний видно, что наличие керамического наполнителя в материале приводит к увеличению ударной вязкости более чем на 30%. Структура излома, характерная для 3D-печатных образцов, свидетельствует об увеличении хрупкой фазы разрушения в сравнении с образцами из чистого PLA [14, 15]. Кроме того, отсутствие расслоений в месте излома говорит о прочной межслойной адгезии образцов в процессе удара.

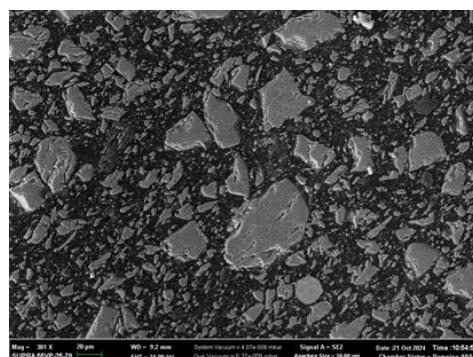
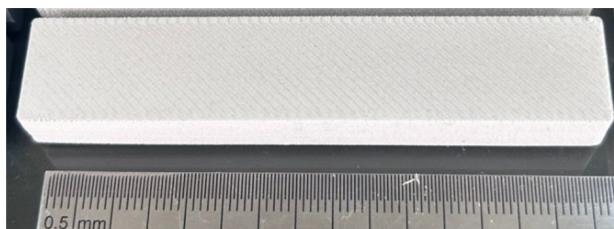


Рис. 1. Структура ПККМ после 3D-печати  
Fig. 1. Structure of PCCM after 3D printing

a)



б)



Рис. 2. Полимер-керамический образец для испытаний на удар:  
а) образец до испытаний; б) образец после испытаний

Fig. 2. Polymer-ceramic sample for impact testing: a) sample before testing; b) sample after testing

Исследование возможности получения керамических изделий из силиката циркония с использованием полимер-керамического филамента заключалось в проведении термической постобработки путем удаления полимерного связующего и спекания керамических частиц. Температурные режимы для проведения термического удаления подбирались исходя из данных ТГА, ДСК анализов (рис. 3) и рекомендаций производителя. Параметры спекания силиката циркония были выбраны в соответствии со значениями изготовителя филамента.

**Таблица 2  
Результаты механических испытаний ПККМ**

Table 2

**Results of mechanical testing for PCCM**

<b>Ударная вязкость, кДж/м<sup>2</sup></b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Cр.</b>	
PLA + ZrSiO <sub>4</sub>	18,7	21,8	20,6	20,3	
PLA	14,3	14,3	17,6	15,4	
<b>Поверхностная твердость ПККМ</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
PLA + ZrSiO <sub>4</sub>	74	72	72	74	73
PLA	79	76	78	76	75
					<b>Cр.</b>
					76,8

Исходя из зависимости потери массы от температуры можно сделать вывод о незначительном расхождении данных производителя с фактическими, при этом массовая доля наполнителя в исследуемом материале составила 78 масс %.<sup>2</sup>

Для оценки влияния геометрических параметров на качество получаемых керамических изделий были напечатаны образцы различной высоты – от 1 до 5 мм с шагом 1 мм (рис. 4). Термическое удаление связующего проводилось в вакууме с целью уменьшения возможности возникновения дефектов в процессе нагрева. Для удаления связующего образцы нагревали до 450°C при скорости нагрева 0,5°C/мин и выдерживали 2 часа. После этого производился процесс спекания при температуре 1550°C в течение 1 часа.

Результаты показали незначительное влияние толщины образцов на образование деформаций в процессе удаления полимера и спекания керамики (рис. 4). Объемная усадка на основе

<sup>2</sup> The Virtual Foundry – SDS – Zirconium Silicate 24-01. Режим доступа: <https://thevirtualfoundry.com/wp-content/uploads/2025/04/The-Virtual-Foundry-SDS-Zirconium-Silicate-24-01.pdf> (дата обращения: 15.08.2025).

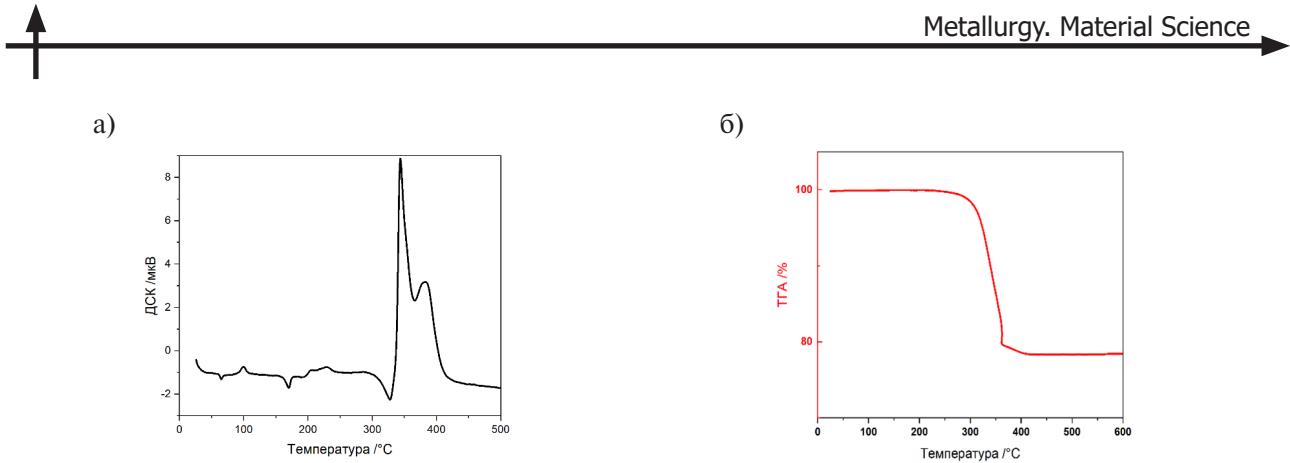


Рис. 3. Результаты термического анализа для ПККМ: а) данные ДСК анализа; б) данные ТГА анализа

Fig. 3. Thermal analysis results for PCCM: a) DSC analysis data; b) TGA analysis data

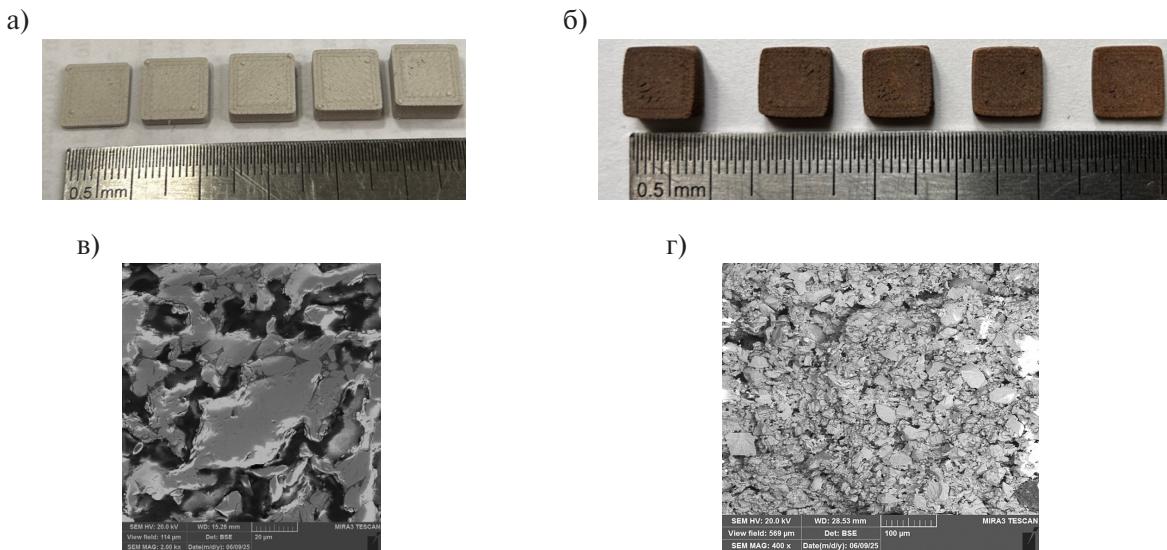


Рис. 4. Образцы из ПККМ до и после обработки: а) образцы после 3D-печати; б) керамические образцы после удаления связующего и спекания; в) поперечное сечение образца; г) излом образца

Fig. 4. Samples of PCCM before and after processing: a) 3D-printed samples; b) ceramic samples after debinding and sintering; c) cross-section of the sample; d) fracture of the sample

измерений геометрических параметров образцов до и после обработки составила около 30%. Анализ структуры полученного керамического материала выявил образование пор и неспеченных участков преимущественно в центральной части образцов. Однако детальное исследование позволило локализовать зоны спекания, что свидетельствует о возможности уменьшения количества пор после настройки параметров процесса постобработки.

### Заключение

В ходе исследования установлено, что FDM-печать с использованием филамента на основе  $ZrSiO_4$  позволяет получать полимер-керамические материалы с повышенными механическими свойствами. Добавление керамического наполнителя способствует увеличению ударной вязкости и сохранению прочных межслойных связей. Термическое удаление связующего и последующее спекание подтвердили возможность получения керамики, однако выявлено образование пор преимущественно в центральной части образцов. Для улучшения качества керамики требуется дальнейшая настройка режимов постобработки.

Полученные результаты подтверждают потенциал использования технологии FDM-печати ПККМ для практических применений. Такие материалы могут применяться для создания изделий с заданными свойствами. В частности, для получения полимер-керамических диэлектрических компонентов радиотехнического оборудования.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Srivastava M., Rathee S. Additive manufacturing: Recent trends, applications and future outlooks, Progress in Additive Manufacturing, 7 (2022) 261–287. DOI: 10.1007/s40964-021-00229-8
- [2] Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sun-kara L.D., Bernat J. Additive manufacturing: A comprehensive review, Sensors, 24 (9) (2024) 2668. DOI: 10.3390/s24092668
- [3] Satish Prakash K., Nancharaih T., Subba Rao V.V. Additive manufacturing techniques in manufacturing – An overview, Materials Today: Proceedings, 5 (2(1)) (2018) 3873–3882. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.642
- [4] Bhatia A., Sehgal A.K. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review, Materials Today: Proceedings, 81 (2) (2023) 1060–1067. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.379
- [5] Doshi M., Mahale A., Singh S.K., Deshmukh S. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects, Materials Today: Proceedings, 50 (5) (2022) 2269–2275. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.003
- [6] Rane K., Strano M. A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts, Advances in Manufacturing, 7 (2019) 155–173. DOI: 10.1007/s40436-019-00253-6
- [7] Ramazani H., Kami A. Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: A review, Progress in Additive Manufacturing, 7 (2022) 609–626. DOI: 10.1007/s40964-021-00250-x
- [8] Zaitceva M., Sotov A., Popovich A., Sufiarov V. Stainless steel 316L fabricated by fused deposition modeling process: microstructure, geometrical and mechanical properties, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 8 (6) (2024) 259. DOI: 10.3390/jmmp8060259
- [9] Zaytsev A.I., Sotov A.V., Abdrahmanova A.E., Popovich A.A. Additive manufacturing of polymer-ceramic materials using fused deposition modeling (FDM) technology: A review, Powder Metallurgy and Functional Coatings (Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya), 18 (6) (2024) 77–88. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-6-77-88
- [10] Sofokleous P., Paz E., Herraiz-Martínez F.J. Design and manufacturing of dielectric resonators via 3D printing of composite polymer/ceramic filaments, Polymers, 16 (18) (2024) 2589. DOI: 10.3390/polym16182589
- [11] Smirnov A., Nikitin N., Peretyagin P., Khmyrov R., Kuznetsova E., Solis Pinargote N.W. Experimental and statistical modeling for effect of nozzle diameter, filling pattern, and layer height of FDM-printed ceramic–polymer green body on biaxial flexural strength of sintered alumina ceramic, Journal of Composites Science, 7 (9) (2023) 381. DOI: 10.3390/jcs7090381
- [12] Zaharin M., Ku Ahmad K., Othman R., Yahaya R., Tarawneh M. Effect of zirconium silicate content on dielectric and mechanical properties of polyurethane elastomer, Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT), 17 (2) (2023).
- [13] Nakamori F., Ohishi Y., Muta H., Kurosaki K., Fukumoto K.-i., Yamanaka S. Mechanical and thermal properties of  $ZrSiO_4$ , Journal of Nuclear Science and Technology, 54 (11) (2017) 1267–1273. DOI: 10.1080/00223131.2017.1359117



[14] **Mishra P.K., P. Senthil, S. Adarsh, M.S. Anoop**, An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts, Composites Communications, 24 (2021) 100605. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100605

[15] **Tunçel O.** Optimization of Charpy impact strength of tough PLA samples produced by 3D printing using the Taguchi method, Polymers, 16 (4) (2024) 459. DOI: 10.3390/polym16040459

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЗАЙЦЕВ Александр Ильич** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

**СОТОВ Антон Владимирович** – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: sotovanton@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

**АБДРАХМАНОВА Анна Эдуардовна** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** – директор ИММиТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

## REFERENCES

- [1] **M. Srivastava, S. Rathee**, Additive manufacturing: Recent trends, applications and future outlooks, Progress in Additive Manufacturing, 7 (2022) 261–287. DOI: 10.1007/s40964-021-00229-8
- [2] **L. Zhou, J. Miller, J. Vezza, M. Mayster, M. Raffay, Q. Justice, Z. Al Tamimi, G. Hansotte, L.D. Sun-kara, J. Bernat**, Additive manufacturing: A comprehensive review, Sensors, 24 (9) (2024) 2668. DOI: 10.3390/s24092668
- [3] **K. Satish Prakash, T. Nancharaih, V.V. Subba Rao**, Additive manufacturing techniques in manufacturing – An overview, Materials Today: Proceedings, 5 (2(1)) (2018) 3873–3882. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.642
- [4] **A. Bhatia, A.K. Sehgal**, Additive manufacturing materials, methods and applications: A review, Materials Today: Proceedings, 81 (2) (2023) 1060–1067. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.379
- [5] **M. Doshi, A. Mahale, S.K. Singh, S. Deshmukh**, Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects, Materials Today: Proceedings, 50 (5) (2022) 2269–2275. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.10.003
- [6] **K. Rane, M. Strano**, A comprehensive review of extrusion-based additive manufacturing processes for rapid production of metallic and ceramic parts, Advances in Manufacturing, 7 (2019) 155–173. DOI: 10.1007/s40436-019-00253-6
- [7] **H. Ramazani, A. Kami**, Metal FDM, a new extrusion-based additive manufacturing technology for manufacturing of metallic parts: A review, Progress in Additive Manufacturing, 7 (2022) 609–626. DOI: 10.1007/s40964-021-00250-x

[8] M. Zaitceva, A. Sotov, A. Popovich, V. Sufiarov, Stainless steel 316L fabricated by fused deposition modeling process: microstructure, geometrical and mechanical properties, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 8 (6) (2024) 259. DOI: 10.3390/jmmp8060259

[9] A.I. Zaytsev, A.V. Sotov, A.E. Abdrahmanova, A.A. Popovich, Additive manufacturing of polymer-ceramic materials using fused deposition modeling (FDM) technology: A review, Powder Metallurgy and Functional Coatings (Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya), 18 (6) (2024) 77–88. DOI: 10.17073/1997-308X-2024-6-77-88

[10] P. Sofokleous, E. Paz, F.J. Herraiz-Martínez, Design and manufacturing of dielectric resonators via 3D printing of composite polymer/ceramic filaments, Polymers, 16 (18) (2024) 2589. DOI: 10.3390/polym16182589

[11] A. Smirnov, N. Nikitin, P. Peretyagin, R. Khmyrov, E. Kuznetsova, N.W. Solis Pinargote, Experimental and statistical modeling for effect of nozzle diameter, filling pattern, and layer height of FDM-printed ceramic–polymer green body on biaxial flexural strength of sintered alumina ceramic, Journal of Composites Science, 7 (9) (2023) 381. DOI: 10.3390/jcs7090381

[12] M. Zaharin, K. Ku Ahmad, R. Othman, R. Yahaya, M. Tarawneh, Effect of zirconium silicate content on dielectric and mechanical properties of polyurethane elastomer, Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT), 17 (2) (2023).

[13] F. Nakamori, Y. Ohishi, H. Muta, K. Kurosaki, K.-i. Fukumoto, S. Yamanaka, Mechanical and thermal properties of  $\text{ZrSiO}_4$ , Journal of Nuclear Science and Technology, 54 (11) (2017) 1267–1273. DOI: 10.1080/00223131.2017.1359117

[14] P.K. Mishra, P. Senthil, S. Adarsh, M.S. Anoop, An investigation to study the combined effect of different infill pattern and infill density on the impact strength of 3D printed polylactic acid parts, Composites Communications, 24 (2021) 100605. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100605

[15] O. Tunçel, Optimization of Charpy impact strength of tough PLA samples produced by 3D printing using the Taguchi method, Polymers, 16 (4) (2024) 459. DOI: 10.3390/polym16040459

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexander I. ZAYTSEV** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-8365>

**Anton V. SOTOV** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: sotovanton@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7303-5912>

**Anna E. ABDRAKHMANOVA** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: abdrahmanova.an@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4494-7300>

**Anatoliy A. POPOVICH** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

**Поступила: 20.09.2025; Одобрена: 10.10.2025; Принята: 10.10.2025.**  
**Submitted: 20.09.2025; Approved: 10.10.2025; Accepted: 10.10.2025.**

Научная статья

УДК 541.136

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31308>



П.А. Новиков<sup>✉</sup>, Г.В. Цветкова, А.А. Попович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> novikov\_pa@spbstu.ru

## ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ КАТОДНОГО МАТЕРИАЛА $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИРОВАНИЯ С ПЕРЕЗАРЯДОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ *IN-SITU* ДИФРАКЦИИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

**Аннотация.** В данной статье представлен детальный анализ катодного материала  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$  (NCM811) с использованием непрерывной *in-situ* рентгеновской дифрактометрии во время циклирования ячейки в диапазоне напряжений от 2,7 В до 4,8 В, что вело к ее перезаряду. Исследовалась изменения кристаллической структуры материала в процессе заряда и разряда. Показано снижение емкости, вызванное деградацией, а также выявлена зависимость параметров элементарной ячейки материала от применяемого в ходе циклирования напряжения. Проведен анализ причин не обратимых структурных изменений катодного материала, возникающих при интеркаляции и деинтеркаляции ионов лития. Полученные результаты открывают возможности разработки эффективных методов снижения факторов деградации за счет понимания механизмов разрушения материала.

**Ключевые слова:** литий-ионные аккумуляторы, катодные материалы, дифракция рентгеновских лучей, структурная деградация материала.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (Соглашение № 075-15-2025-210 от 04.04.2025).

**Для цитирования:**

Новиков П.А., Цветкова Г.В., Попович А.А. Изучение эволюции структуры катодного материала  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$  в условиях циклирования с перезарядом с применением *in-situ* дифракции рентгеновских лучей // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 3. С. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31308>



P.A. Novikov , G.V. Tsvetkova, A.A. Popovich

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

novikov\_pa@spbstu.ru

## STUDY OF EVOLUTION OF THE STRUCTURE OF THE CATHODE MATERIAL $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ UNDER CONDITIONS OF CYCLING WITH RECHARGING USING *IN-SITU* X-RAY DIFFRACTION

*Abstract.* This article presents a detailed analysis of the cathode material  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  (NCM811) using continuous *in-situ* X-ray diffractometry during cell cycling in the voltage range from 2.7 V to 4.8 V, which led to its recharge. The changes in the crystal structure of the material during charging and discharging are investigated. The decrease in capacitance caused by degradation is shown, and the dependence of the parameters of the unit cell of the material on the voltage applied during cycling is revealed. The analysis of the causes of irreversible structural changes in the cathode material that occur during intercalation and deintercalation of lithium ions is carried out. The results obtained open up the possibility of developing effective methods to reduce degradation factors by understanding the mechanisms of material destruction.

*Keywords:* lithium-ion batteries, cathode materials, X-ray diffraction, structural degradation of the material.

*Acknowledgements:* The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the strategic academic leadership program “Priority 2030” (Agreement No. 075-15-2025-210 dated 04.04.2025).

*Citation:*

Novikov P.A., Tsvetkova G.V., Popovich A.A., Study of evolution of the structure of the cathode material  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  under conditions of cycling with recharging using *in-situ* X-ray diffraction, Global Energy, 31 (03) (2025) 107–116, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31308>

**Введение.** Широкое использование электронных устройств во множестве сфер жизни современного человека приводит к гигантскому спросу на портативные устройства хранения энергии с высокими удельными характеристиками, но при этом не приносящие большого вреда окружающей среде. Такими устройствами на сегодняшний день являются литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) [1]. Обладая такими ключевыми характеристиками, как высокая плотность энергии, низкая скорость саморазряда, большая вариативность токовых нагрузок и отсутствие эффекта памяти, ЛИА активно используются в портативных электронных устройствах и в электротранспорте [2]. Несмотря на впечатляющие отличительные свойства данной аккумуляторной системы, циклический ресурс ее ограничен из-за необратимой деградации электродных материалов в ходе эксплуатации. Изучение процессов деградации и борьбы с ней, а также разработка новых функциональных электродных материалов представляют интерес для многих научных групп, работающих в области химических источников тока [3–6].

В нынешних реалиях наиболее часто используемые катодные материалы в ЛИА – это слоистые тройные литированные оксиды переходных металлов  $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$  ( $x + y + z = 1$ ) [7]. В зависимости от стехиометрического соотношения переходных металлов можно регулировать свойства аккумулятора: так, например, при увеличении количества марганца в структуре



увеличивается ресурс жизни ЛИА, при увеличении никеля растет плотность энергии, а при увеличении концентрации кобальта улучшается электронная проводимость материала [8–10]. Таким образом, в погоне за высокими удельными емкостными характеристиками материал NCM811 с высоким содержанием никеля является наиболее популярным для использования в качестве катодного материала, но его относительно короткий циклический ресурс сильно ограничивает его применение.

Основные характеристики, отвечающие за электрохимическое поведение материала, такие как удельная емкость, электронная и ионная проводимости, циклический ресурс, определяются кристаллической структурой данного материала. В ходе работы аккумулятора катодный материал подвергается ряду структурных изменений, связанных с интеркаляцией/деинтеркаляцией лития. Необратимые структурные изменения приводят к деградации материала и, как следствие, к ухудшению его электрохимических характеристик.

Целью данной работы является исследование структурных трансформаций в катодном материале типа NCM811 в ходе циклирования ЛИА для определения ключевых факторов, ведущих к разрушению кристаллической структуры, и влияния данного процесса на электрохимические свойства катодного материала.

### **Материалы и методы**

Исследуемый электрод был приготовлен методом намазки на алюминиевую фольгу суспензии, состоящей из 80 мас.% NCM811, 10% токопроводящей добавки из сажи и 10% связующего PVDF, растворенной в Н-метилпирролидоне. Все компоненты для сборки испытательного макета и ячейки *in-situ* были подвергнуты обработке в этаноле в ультразвуковой ванне в течение трех минут, а затем высушены в вакуумном шкафу при 80°C в течение 12 часов.

Ячейка *in-situ* была собрана в перчаточном боксе в атмосфере аргона, содержание воды не превышало 10 ppm, содержание кислорода составляло не более 500 ppm. Литиевая фольга толщиной 0,6 мм и диаметром 16 мм использовалась как противоэлектрод в испытательном макете. В качестве электролита использовался раствор 1 M LiPF<sub>6</sub> в смеси растворителей в соотношении 1:1:1 диэтил карбоната, диметил карбоната и этилен карбоната. В роли сепаратора был использован материал Celgard 2400 с толщиной 25 мкм.

Исследование емкостных характеристик проводилось с использованием системы тестирования батарей BTS NEWARE CT-3008-5V10mA (Neware, Китай). Кристаллическая структура катодного материала была изучена с помощью дифрактометра Bruker (Германия) в режиме непрерывной съемки в диапазоне углов от 15° до 70° с шагом в 0,02° и временем выдержки 0,7 секунды на каждом шаге. Структурные параметры были вычислены по Ритвельду с использованием программного обеспечения TOPAS5.

### **Результаты и обсуждение**

На рис. 1а представлена рентгенограмма исходного материала – тройного литированного оксида переходных металлов  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$ . Все пики индексируются фазой  $a\text{-NaFeO}_2$ , относящейся к пространственной группе R3m. Параметры элементарной ячейки  $a$  и  $c$ , определенные методом Ритвельда, составили 2,873 Å и 14,203 Å соответственно,  $c/a = 4,95$ . Явное разделение пиков (006/102) и (108/110) характеризует слоистую структуру материала [11, 12]. Структурный параметр I (003/104), отношение интенсивностей пиков 003 и 104, составил 2,29, что говорит о низкой степени катионного смешения в материале и, как следствие, об упорядоченности структуры катодного материала. Дифрактограмма катодного материала до циклирования в собранной ячейке *in-situ* продемонстрирована на рис. 1б. Параметры элементарной ячейки:  $a = 2,871$  Å,  $c = 14,199$  Å. Явление незначительного изменения параметров кристаллической решетки в сборке *in-situ* уже было рассмотрено другими группами ученых [13].

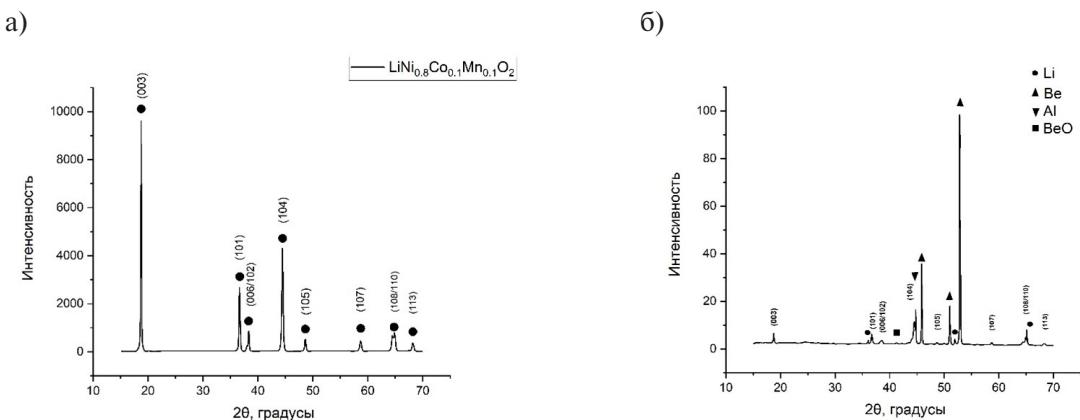


Рис. 1. Рентгенограмма исходного порошка тройного литированного оксида (а),  
рентгенограмма исходного порошка в собранной ячейке *in-situ* (б)

Fig. 1. X-ray of the initial powder of lithium oxide (a), X-ray of the initial powder in the assembled cell *in-situ* (b)

Заметное снижение интенсивности пика (003) по отношению к остальным пикам может быть связано с углом рентгеновского излучения, зависящим от глубины проникновения.

Рис. 2а демонстрирует рентгенограммы испытательного макета во время циклирования. Немонотонное смещение пика (003) в ходе заряда демонстрирует нелинейное изменение параметра элементарной ячейки  $c$  (рис. 2б). Параметр  $a$ , наоборот, непрерывно снижается, так же, как и пик (110), постоянно сдвигается вправо (рис. 2в).

На рис. 3 показаны изменение параметров  $a$  и  $c$  ячейки с NCM811 и зависимость потенциала от количества ионов лития, остающихся в решетке катодного материала после пятого цикла. В течение одного цикла можно определить пять стадий структурных изменений. На первой стадии, до значения напряжения 4,05 В, начинается процесс заряда, в ходе которого ионы лития интеркалируют в структуру катодного материала. Таким образом, силы электростатического отталкивания слоев кислорода растут, что, в свою очередь, приводит к увеличению параметра  $c$ . Параметр  $a$  уменьшается, так как компенсация заряда происходит при окислении переходных металлов.

На второй стадии при диапазоне напряжений от 4,05 до 4,4 В медленный рост параметра  $c$  заменяется его быстрым падением. Объяснением этого процесса может быть замещение атомов лития в кристаллической решетке атомами  $\text{Ni}^{2+}$  из-за близких радиусов ионов ( $\text{Li}^+ = 0,76 \text{ \AA}$ ,  $\text{Ni}^{2+} = 0,69 \text{ \AA}$ ) [14]. Помимо этого структура катодного материала также начнет выделение ионов  $\text{O}^{2-}$ , из-за чего отталкивание кислородных слоев уменьшается [15].

В ходе третьей стадии параметр  $a$  остается неизменным, таким образом, компенсация заряда происходит уже не за счет окисления переходных металлов, а только за счет высвобождения лития и кислорода. Параметр  $c$  продолжает уменьшаться по тому же механизму, что и во второй стадии.

Четвертая стадия начинается при процессе разряда. Параметр  $a$  постепенно увеличивается на протяжении всего процесса заряда из-за уменьшения содержания переходных металлов. Параметр  $c$  увеличивается с момента стабилизации структуры ионами лития, которые занимают вакантные места переходных металлов. Этот процесс вызывает возникновение физических дефектов в кристаллической решетке материала. Падение напряжения при начале разряда объясняется процессами поляризации, связанными с расширением элементарной ячейки.

На пятой стадии вакансии никеля заполнены, из-за чего литий встраивается только в литиевые слои, таким образом, электростатическое высвобождение слоев кислорода уменьшается, как и параметр  $c$  [16].

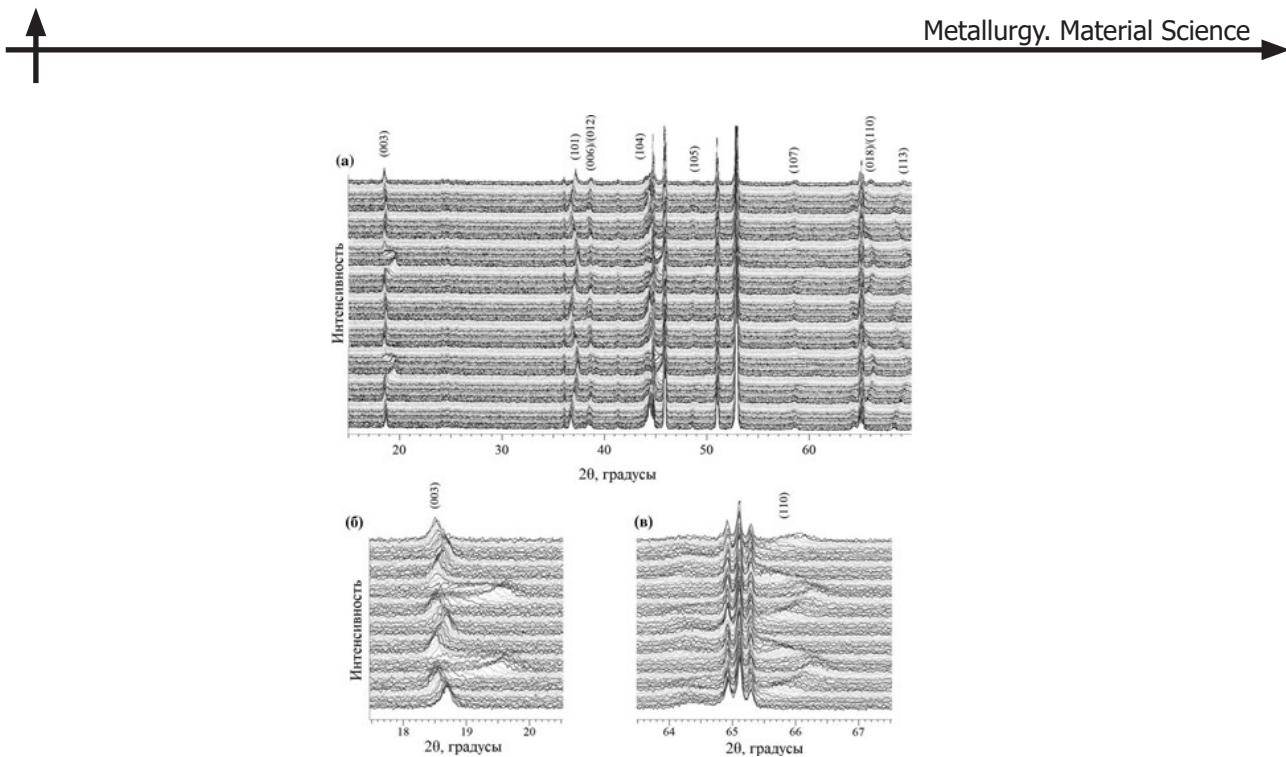


Рис. 2. Рентгенограмма 1 и 2 цикла заряда-разряда в диапазонах градусов:  
а) от 15 до 69°; б) от 15 до 25°; в) от 63 до 68°

Fig. 2. X-ray 1 and 2 of charge-discharge cycles in the range of degrees:  
a) from 15 to 69°; b) from 15 to 25°; c) from 63 to 68°

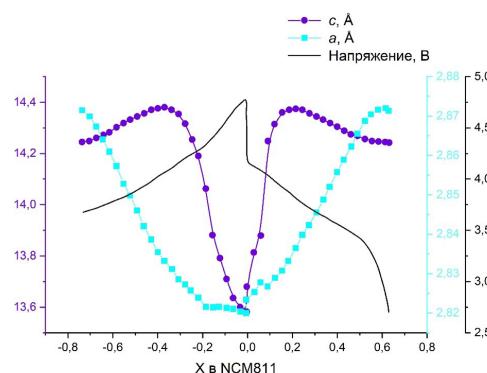


Рис. 3. Соответствие потенциала заряда/разряда параметрам элементарной ячейки  
Fig. 3. Correspondence of the charge/discharge potential to the unit cell parameters

На рис. 4 отображены объемные изменения элементарной ячейки  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  и изменения отношения параметров  $c/a$  в зависимости от потенциала заряда. Стремительное сжатие кристаллической решетки и заметное уменьшение отношения  $c/a$  из-за высвобождения кислорода при заряде выше 4,2 В ведут к механическому напряжению в элементарной ячейке, которое может привести к разрушению структуры катода.

На рис. 5 отображены результаты рентгенофазового анализа испытуемого макета в состоянии разряда после нескольких циклов. Образование фазы оксида лития ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) объясняется реакцией металлического лития с кислородом, выделяемым в ходе процесса заряда. Смещение пика (003) влево и пика (110) вправо демонстрирует частичную деинтеркаляцию лития из структуры литированного оксида.

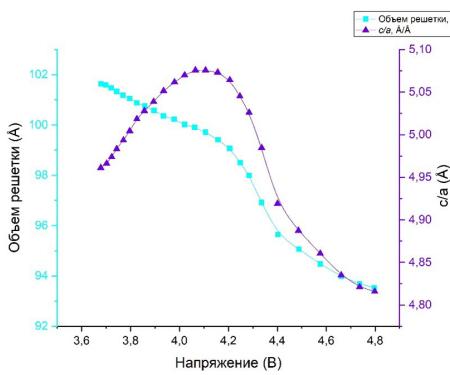


Рис. 4. Изменение объема элементарной ячейки и отношения параметров  $c/a$  в ходе заряда

Fig. 4. Changes in the volume of the unit cell and the ratio of the  $c/a$  parameters during charging

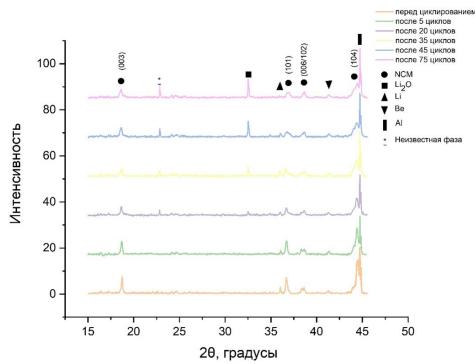


Рис. 5. Дифрактограммы ячейки *in-situ* на разных циклах

Fig. 5. *In-situ* cell diffractograms in different cycles

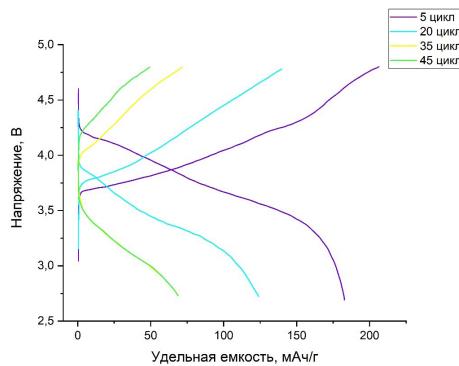


Рис. 6. Зарядно-разрядные кривые материала  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  в ячейке *in-situ* на разных циклах

Fig. 6. Charge-discharge curves of  $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$  material in an *in-situ* cell in different cycles

На рис. 6 продемонстрированы значения емкости, которые заметно падают в ходе циклизации под влиянием факторов деградации. К десятому циклу удержание удельной разрядной емкости составило 80% (начальная разрядная емкость составила 211 мАч/г, на десятом цикле – 168 мАч/г).



## Заключение

В данной статье представлено изучение эволюции кристаллической структуры катодного материала  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$  в ходе циклизации в условиях перезаряда до напряжения в 4,8 В. Было обнаружено, что при значениях потенциала около 4,05 В – в связи с сильным эффектом отталкивания слоев кислорода – параметр с увеличивается, а затем сразу же уменьшается, что вызвано явлением высвобождения кислорода из структуры и диффузией ионов никеля в литиевые слои. При разряде происходит обратный процесс: параметр сначала увеличивается, затем снижается – в связи с внедрением ионов лития в вакантные места первоначально в слоях никеля, а затем уже в слоях лития. При напряжении в 4,4 В параметр а уменьшается – в связи с окислением переходных металлов, а затем его значения становится стабильными, так как дальнейшая компенсация заряда происходит за счет интеркаляции кислорода. С момента начала разряда до достижения напряжения 2,7 В параметр а постоянно увеличивается.

Происходящее во время заряда высвобождение кислорода приводит к структурной деградации материала и, как следствие, к снижению емкостных показателей в ходе циклических испытаний. Кроме того, кислород окисляет диффузный литий и, вероятно, может также реагировать с электролитом и анодным материалом. При значении напряжения 4,2 В происходит быстрое сжатие ячейки, что приводит к механическим напряжениям в материале, а это, в свою очередь, вызывает искажение решетки в структуре и затрудняет диффузию ионов лития.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. Electrical energy storage for the grid: A battery of choices, *Science*, 344 (6058) (2011) 928–935. DOI: 10.1126/science.1212741
- [2] Datt Bhatt M., O'Dwyer C. Recent progress in theoretical and computational investigations of Li-ion battery materials and electrolytes, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17 (7) (2015) 4799–4844. DOI: 10.1039/C4CP05552G
- [3] Nitta N., Wu F., Lee J.T., Yushin G. Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, 18 (5) (2015) 252–264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [4] Nilmoung S., Limphirat W., Maensiri S. Electrochemical properties of ACNF/ $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  composite nanostructures for energy storage devices, *SSRN*, (2021). DOI: 10.2139/ssrn.3972614
- [5] Korobov D.D., Mitrofanov I.V., Pushnitsa K.A., Kim A.E., Koshtyal Yu.M., Pechen L.S., Popovich A.A., Maximov M.Yu. Features of improved capacity at high discharge rate of K-doped Li-rich cathodes for LIBs, *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 778–783. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.566
- [6] Zang G., Zhang J., Xu S., Xing Y. Techno-economic analysis of cathode material production using flame-assisted spray pyrolysis, *Energy*, 218 (2021) 119504. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119504
- [7] Dufo-López R., Carvalho M., Pasaoglu G. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89 (2018) 292–308. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002
- [8] Huang W., Lin C., Zhang M., Li S., Chen Z., Zhao W., Zhu C., Zhao Q., Chen H., Pan F. Revealing roles of Co and Ni in Mn-rich layered cathodes, *Advanced Energy Materials*, 11 (41) (2021) 2102646. DOI: 10.1002/aenm.202102646
- [9] Lee H., Suh J.H., Chaudhary R., Mun J., Kim J.H. Materials challenges in high-energy batteries enabling ultra-fast charging and non-flammable performance for electric vehicles, *Frontiers in Batteries and Electrochemistry*, 4, (2025) 1636618. DOI: 10.3389/fbael.2025.1636618
- [10] Takegami D., Kawai K., Ferreira-Carvalho M., Rößler S., Liu C.-E., Kuo C.-Y., Chang C.-F., Minamida A., Miyazaki T., Okubo M., Tjeng L.H., Mizokawa T. Valence study of  $\text{Li}(\text{Ni}_{0,5}\text{Mn}_{0,5})_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$  and  $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ : The role of charge transfer and charge disproportionation, *Physical Review Materials*, 8 (2024) 055401. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.8.055401

- [11] Yang C., Hao Y., Wang J., Zhang M., Song L., Qu J. Research on the facile regeneration of degraded cathode materials from spent  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  lithium-ion batteries, *Frontiers in Chemistry*, 12 (2024) 1400758. DOI: 10.3389/fchem.2024.1400758
- [12] Hu G., Qi X., Hu K., Lai X., Zhang X., Du K., Peng Z., Cao Y. A facile cathode design with a  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$  core and an  $\text{AlF}_3$ -activated  $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Mn}_{0.6}\text{O}_2$  shell for Li-ion batteries, *Electrochimica Acta*, 265 (2018) 391–399. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.01.176
- [13] Hausbrand R., Cherkashinin G., Ehrenberg H., Gröting M., Albe K., Hess C., Jaegermann W. Fundamental degradation mechanisms of layered oxide Li-ion battery cathode materials: Methodology, insights and novel approaches, *Materials Science and Engineering: B*, 192 (2015) 3–25. DOI: 10.1016/j.mseb.2014.11.014
- [14] Abdel-Ghany A.E., El-Tawil R.S., Hashem A.M., Mauger A., Julien C.M. Integrated lithium-rich  $y\text{Li}_{2}\text{MnO}_3 \cdot (1-y)\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  layered cathode nanomaterials for lithium-ion batteries, *International Journal of Molecular Sciences*, 26 (3) (2025) 1346. DOI: 10.3390/ijms26031346
- [15] Liang C., Longo R.C., Kong F., Zhang C., Nie Y., Zheng Y., Kim J.-S., Jeon S., Choi S., Cho K. Obstacles toward unity efficiency of  $\text{LiNi}_{1-2x}\text{Co}_x\text{Mn}_x\text{O}_2$  ( $x=0\sim 1/3$ ) (NCM) cathode materials: Insights from ab initio calculations, *Journal of Power Sources*, 340 (2017) 217–228. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.056
- [16] Koga H., Croguennec L., Ménétrier M., Mannessiez P., Weill F., Delmas C. Different oxygen redox participation for bulk and surface: A possible global explanation for the cycling mechanism of  $\text{Li}_{1.20}\text{Mn}_{0.54}\text{Co}_{0.13}\text{Ni}_{0.13}\text{O}_2$ , *Journal of Power Sources*, 236 (2013) 250–258. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.02.075

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НОВИКОВ Павел Александрович** – директор НОЦ «МТиМ», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: novikov\_pa@spbstu.ru

**ЦВЕТКОВА Галина Викторовна** – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.  
E-mail: Tsvetkova\_gv@mail.ru

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** – директор ИММиТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

## REFERENCES

- [1] B. Dunn, H. Kamath, J.-M. Tarascon, Electrical energy storage for the grid: A battery of choices, *Science*, 344 (6058) (2011) 928–935. DOI: 10.1126/science.1212741
- [2] M. Datt Bhatt, C. O'Dwyer, Recent progress in theoretical and computational investigations of Li-ion battery materials and electrolytes, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17 (7) (2015) 4799–4844. DOI: 10.1039/C4CP05552G
- [3] N. Nitta, F. Wu, J.T. Lee, G. Yushin, Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today*, 18 (5) (2015) 252–264. DOI: 10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [4] S. Niloung, W. Limphirat, S. Maensiri, Electrochemical properties of ACNF/ $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  composite nanostructures for energy storage devices, *SSRN*, (2021). DOI: 10.2139/ssrn.3972614



- [5] D.D. Korobov, I.V. Mitrofanov, K.A. Pushnitsa, A.E. Kim, Yu.M. Koshtyal, L.S. Pechen, A.A. Popovich, M.Yu. Maximov, Features of improved capacity at high discharge rate of K-doped Li-rich cathodes for LIBs, *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 778–783. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.566
- [6] G. Zang, J. Zhang, S. Xu, Y. Xing, Techno-economic analysis of cathode material production using flame-assisted spray pyrolysis, *Energy*, 218 (2021) 119504. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119504
- [7] R. Dufo-López, M. Carvalho, G. Pasaoglu, The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89 (2018) 292–308. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.002
- [8] W. Huang, C. Lin, M. Zhang, S. Li, Z. Chen, W. Zhao, C. Zhu, Q. Zhao, H. Chen, F. Pan, Revealing roles of Co and Ni in Mn-rich layered cathodes, *Advanced Energy Materials*, 11 (41) (2021) 2102646. DOI: 10.1002/aenm.202102646
- [9] H. Lee, J.H. Suh, R. Chaudhary, J. Mun, J.H. Kim, Materials challenges in high-energy batteries enabling ultra-fast charging and non-flammable performance for electric vehicles, *Frontiers in Batteries and Electrochemistry*, 4, (2025) 1636618. DOI: 10.3389/fbael.2025.1636618
- [10] D. Takegami, K. Kawai, M. Ferreira-Carvalho, S. Rößler, C.-E. Liu, C.-Y. Kuo, C.-F. Chang, A. Minamida, T. Miyazaki, M. Okubo, L.H. Tjeng, T. Mizokawa, Valence study of  $\text{Li}(\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{0.5})_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$  and  $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_2$ : The role of charge transfer and charge disproportionation, *Physical Review Materials*, 8 (2024) 055401. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.8.055401
- [11] C. Yang, Y. Hao, J. Wang, M. Zhang, L. Song, J. Qu, Research on the facile regeneration of degraded cathode materials from spent  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  lithium-ion batteries, *Frontiers in Chemistry*, 12 (2024) 1400758. DOI: 10.3389/fchem.2024.1400758
- [12] G. Hu, X. Qi, K. Hu, X. Lai, X. Zhang, K. Du, Z. Peng, Y. Cao, A facile cathode design with a  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$  core and an AlF<sub>3</sub>-activated  $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.2}\text{Mn}_{0.6}\text{O}_2$  shell for Li-ion batteries, *Electrochimica Acta*, 265 (2018) 391–399. DOI: 10.1016/j.electacta.2018.01.176
- [13] R. Hausbrand, G. Cherkashinin, H. Ehrenberg, M. Grötting, K. Albe, C. Hess, W. Jaegermann, Fundamental degradation mechanisms of layered oxide Li-ion battery cathode materials: Methodology, insights and novel approaches, *Materials Science and Engineering: B*, 192 (2015) 3–25. DOI: 10.1016/j.mseb.2014.11.014
- [14] A.E. Abdel-Ghany, R.S. El-Tawil, A.M. Hashem, A. Mauger, C.M. Julien, Integrated lithium-rich  $y\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-y)\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$  layered cathode nanomaterials for lithium-ion batteries, *International Journal of Molecular Sciences*, 26 (3) (2025) 1346. DOI: 10.3390/ijms26031346
- [15] C. Liang, R.C. Longo, F. Kong, C. Zhang, Y. Nie, Y. Zheng, J.-S. Kim, S. Jeon, S. Choi, K. Cho, Obstacles toward unity efficiency of  $\text{LiNi}_{1-2x}\text{Co}_x\text{Mn}_x\text{O}_2$  ( $x=0\sim 1/3$ ) (NCM) cathode materials: Insights from ab initio calculations, *Journal of Power Sources*, 340 (2017) 217–228. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.056
- [16] H. Koga, L. Croguennec, M. Ménétrier, P. Mannessiez, F. Weill, C. Delmas, Different oxygen redox participation for bulk and surface: A possible global explanation for the cycling mechanism of  $\text{Li}_{1.20}\text{Mn}_{0.54}\text{Co}_{0.13}\text{Ni}_{0.13}\text{O}_2$ , *Journal of Power Sources*, 236 (2013) 250–258. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.02.075

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Pavel A. NOVIKOV** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: novikov\_pa@spbstu.ru

**Galina V. TSVETKOVA** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
E-mail: Tsvetkova\_gv@mail.ru

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: popovicha@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

Поступила: 22.07.2025; Одобрена: 21.08.2025; Принята: 29.08.2025.  
Submitted: 22.07.2025; Approved: 21.08.2025; Accepted: 29.08.2025.