

Том 31, №4, 2025



ISSN 2782-6724

Глобальная энергия

Санкт-Петербург

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;
Кищенко А.В., академик РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», НИТУ «МИСиС», Москва, Российская Федерация;
Костюк В.В., академик РАН, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация;
Лагарьков А.Н., академик РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация;
Окрепилов В.В., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Рудской А.И., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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, Российская Федерация;
Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Забонин В.Н., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Каляев 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, Российская Федерация;
Куколев М.И., д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Митяков 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;
Тендлер 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, Российская Федерация;
Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Цемко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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 ВИНТИ 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: 30.12.2025

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025

31 (4) 2025



ISSN 2782-6724

Global Energy

St. Petersburg

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. Czestochova Polytechnic University, Poland;

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

Tendler 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: 30.12.2025

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025

Содержание

Энергетика. Электротехника

Веселовский К.К., Белей В.Ф. Мировой опыт эксплуатации изолированных энергосистем и перспективы для Калининградского региона.....	7
Воронин И.С., Коровкин Н.В., Долбин К.С. Оптимальная расстановка активно-адаптивных устройств для моделей энергосистем большой размерности.....	26
Белько В.О., Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Федотов Н.А., Феклистов Е.Г., Шикова Т.М. Физико-механические характеристики слюдосодержащей изоляции обмоток статора высоковольтных электрических машин.....	41
Калимов А.Г., Аль Наими К.Х.М. Повышение стабильности ветроэнергетических установок за счет использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии.....	58
Липински В., Риаз А., Сандовал А.Б., Скрябин И. Оксид церия в солнечном термохимическом производстве возобновляемых видов топлива.....	69

Металлургия. Материаловедение

Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И., Попович А.А. Механические свойства ячеистых структур из термополиуретана ТПУ 95а с управляемой пористостью для протезных изделий переменной жесткости, полученных 3D-печатью.....	79
Демьянов Г.В., Глебова Е.Ю., Голубев И.А., Альхименко А.А., Крук П.Е. Исследование деградации низколегированной стали в условиях совместного воздействия углекислотной коррозии и абразивного износа.....	90
Ганин С.В., Блинов С.А., Левитский А.М. Влияние технологии вспенивания на характер пористой структуры деформированных заготовок из пеноалюминия.....	105
Попов А.И., Теплухин В.Г., Радкевич М.М., Беляков С.В., Власов И.И. Формирование нанопервохностей нержавеющей сталей с повышенной коррозионной стойкостью за счет струйной электролитно-плазменной обработки.....	118
Пезин Д.А., Ермаков Б.С., Нечаев Д.В. Работоспособность термопластичных полимеров в условиях Арктического региона Российской Федерации.....	134
Блинов С.А., Левитский А.М., Зотов О.Г., Голубков Н.А. Сравнительные испытания коррозионной стойкости медного и алюминиевого порошковых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления.....	146



Contents

Energetics. Electrical engineering

Veselovksy K.K., Beley V.F. World experience of isolated power systems operation and prospects for Kaliningrad region.....	7
Voronin I.S., Korovkin N.V., Dolbin K.S. Optimal allocation of FACTS devices for large-scale power system models.....	26
Belko V.O., Mannanov E.R., Kostelov A.M., Fedotov N.A., Feklistov E.G., Shikova T.M. Physical and mechanical properties of mica-based insulation for high-voltage stator windings.....	41
Kalimov A.G., Al Naimi Q.H.M. Improving the stability of wind power plants through the use of superconducting inductive energy storage devices.....	58
Липински В., Риаз А., Сандовал А.Б., Скрябин И. Оксид церия в солнечном термохимическом производстве возобновляемых видов топлива.....	69

Metallurgy. Material Science

Abdrakhmanova A.E., Sotov A.V., Zaytsev A.I., Popovich A.A. Mechanical properties of cellular structures made of thermopolyurethane TPU 95a with controlled porosity for prosthetic devices of variable stiffness, obtained by 3D printing.....	79
Demyanov G.V., Glebova E.Y., Golubev I.A., Alkhimenko A.A., Kruk P.E. Investigation of low-alloy steel degradation under combined carbon dioxide corrosion and abrasive wear conditions.....	90
Ganin S.V., Blinov S.A., Levitsky A.M. Effect of foaming technology on the porous structure of deformed foam aluminum blanks.....	105
Popov A.I., Teplukhin V.G., Radkevich M.M., Belyakov S.V., Vlasov I.I. Formation of nanosurfaces of stainless steels with increased corrosion resistance due to jet electrolyte-plasma treatment.....	118
Pezin D.A., Ermakov B.S., Nechaev D.V. Performance of thermoplastic polymers in the conditions of the Arctic Region of the Russian Federation.....	134
Blinov S.A., Levitsky A.M., Zotov O.G., Golubkov N.A. Comparative corrosion resistance tests of copper and aluminum powder coatings applied by cold gas dynamic spraying.....	146

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.311:620.92 (470.26)

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31401>



К.К. Веселовский ✉, В.Ф. Белей

Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия

✉ weselkirill@mail.ru

МИРОВОЙ ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ КАЛИНИНГРАДСКОГО РЕГИОНА

Аннотация. Переход Калининградской энергосистемы в изолированный режим работы поднимает вопросы оптимизации существующего генерирующего комплекса и обеспечения энергетической безопасности. Целью исследования является определение путей повышения надежности и эффективности энергосистемы Калининградской области на основе мирового опыта. Для достижения цели в работе предложена и обоснована методика сравнительного анализа изолированных энергосистем, основанная на комплексе критериев (степень изоляции, зависимость от импорта топлива, сопоставимость масштабов, уровень интеграции возобновляемых источников энергии). На основе данной методики был проведен анализ структуры генерации, технологий и аварийных режимов энергосистем Оаху (США), Кипра, Крита (ЕС), Тенерифе и Гран-Канарии (Испания). Анализ показал, что ключевыми факторами для устойчивого развития изолированных систем являются интеграция возобновляемых источников энергии, развертывание систем накопления энергии и создание межсистемных связей. Выполненный анализ позволил сформировать научно обоснованную концепцию реструктуризации генерирующего комплекса энергосистемы Калининградской области. Предполагается, что приоритетными направлениями должны стать развитие ветроэнергетического потенциала региона и внедрение систем накопления электроэнергии, что может оптимизировать работу тепловых электростанций, повысить устойчивость системы и снизить зависимость от импортируемого топлива.

Ключевые слова: изолированная энергосистема, Калининградская область, Гавайские острова, Крит, Кипр, Канарские острова, системы накопления электроэнергии, надежность энергоснабжения, энергетическая безопасность.

Для цитирования:

Веселовский К.К., Белей В.Ф. Мировой опыт эксплуатации изолированных энергосистем и перспективы для Калининградского региона // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 7–25. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31401>

K.K. Veselovksy  , V.F. BeleyKaliningrad State Technical University,
Kaliningrad, Russia weselkirill@mail.ru

WORLD EXPERIENCE OF ISOLATED POWER SYSTEMS OPERATION AND PROSPECTS FOR KALININGRAD REGION

Abstract. The transition of the Kaliningrad power system to isolated operation raises issues concerning the optimization of the existing generating complex and ensuring energy security. The objective of this research is to identify ways to enhance the reliability and efficiency of the Kaliningrad region's power system based on international experience. To achieve this goal, the paper proposes and substantiates a methodology for a comparative analysis of isolated power systems based on a set of criteria (isolation, dependence on fuel imports, comparability of scale and the level of renewable energy sources integration). Based on this methodology, an analysis of the generation structure, technologies and emergency operating conditions was conducted for the power systems of Oahu (USA), Cyprus, Crete (EU), Tenerife, and Gran Canaria (Spain). The analysis demonstrated that the key factors for the sustainable development of isolated systems are the integration of renewable energy sources, the deployment of energy storage systems and the establishment of intersystem connections. This analysis has enabled the formulation of a scientifically-grounded concept for restructuring the generating complex of the Kaliningrad power system. It is proposed that the priority areas should be the development of the region's wind power potential and the implementation of electricity storage systems. This can optimize the operation of thermal power plants, increase system stability, and reduce dependence on imported fuel.

Keywords: isolated energy system, Kaliningrad region, Hawaii, Crete, Cyprus, Canary Islands, energy storage systems, reliability of energy supply, energy security.

Citation:

Veselovksy K.K., Beley V.F., World experience of isolated power systems operation and prospects for Kaliningrad region, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 7–25, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31401>

Введение. С 8 февраля 2025 г. Калининградский регион в связи с выходом стран Балтии из синхронной зоны энергообъединения ЕЭС/ОЭС (IPS/UPS) функционирует как «энергетический остров» наряду с такими регионами Российской Федерации, как Сахалин, Камчатка, Магадан и районы Крайнего Севера, которые сталкиваются со схожими вызовами в экономике, энергетической безопасности, надежности и эффективности энергоснабжения [1–3].

Для обеспечения энергетической безопасности региона реализована комплексная программа:

- 1) ввод в эксплуатацию новых генерирующих мощностей на основе газотурбинных (ГТУ), парогазовых (ПГУ) и паросиловых установок (ПСУ) (рис. 1, табл. 1);
- 2) модернизация сетевой и информационной инфраструктуры [4];
- 3) интеграция интеллектуального программно-технического комплекса противоаварийной автоматики, разработанного Научно-техническим центром единой энергетической системы (НТЦ ЕЭС), выполняющего расчет объемов управляющих воздействий в реальном времени [4, 5].

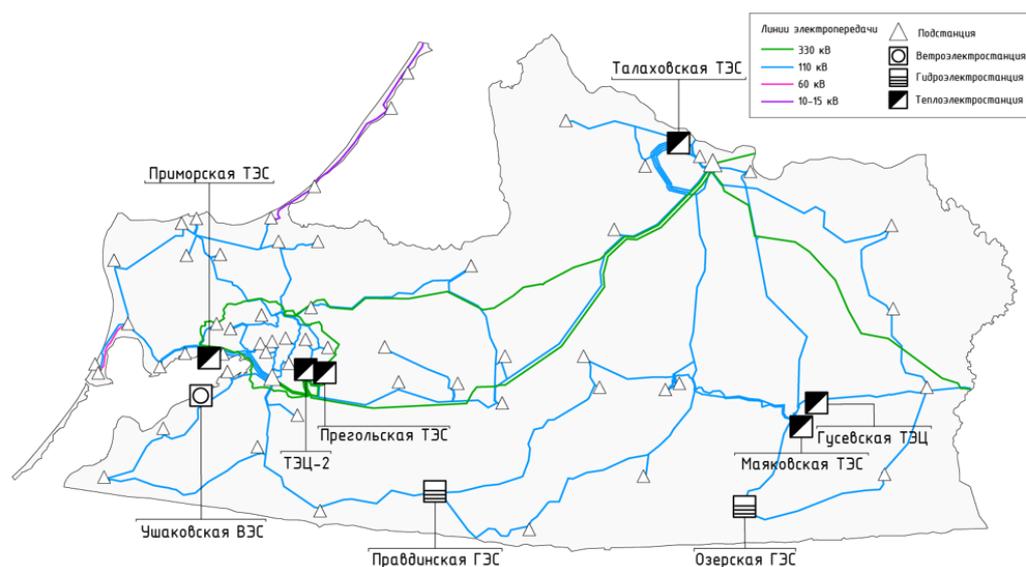


Рис. 1. Карта электроэнергетической инфраструктуры Калининградской области

Fig. 1. Map of Kaliningrad region's electricity infrastructure

Таблица 1

Группы генерации Калининградской области

Table 1

Generation groups of Kaliningrad region

Наименование	Топливо	ПСУ, МВт	ГТУ, МВт	ДГУ, МВт	ПГУ, МВт	Итого, МВт (%)
КТЭЦ-2	газ	—	—	—	2×225	450 (32%)
Прегольская ТЭС	газ	—	—	—	4×110	440 (31,3%)
Приморская ТЭС	уголь	3×65	—	—	—	195 (13,88%)
Талаховская ТЭС	газ	—	2×80	—	—	160 (11,35%)
Маяковская ТЭС	газ	—	2×80	—	—	160 (11,35%)
СЭС	—	—	—	—	—	0 (0%)
ВЭС	—	—	—	—	—	5 (0,3%)
Общая мощность		195 (13,88%)	320 (22,78%)	—	890 (63,35%)	1410 (100%) (1860*)

* 1860 – при учете полной мощности КТЭЦ-2 (900 МВт)

В ходе натурных испытаний и в ряде аварийных ситуаций 2025 г.¹ автоматические системы сработали штатно, что подтвердило способность энергосистемы сохранять устойчивость в изолированном режиме при минимальном объеме принудительных отключений потребителей.

Несмотря на достаточную установленную мощность (1860 МВт), покрывающую потребление региона, функционирование энергосистемы Калининградской области в изолированном режиме сопряжено с рядом системных вызовов:

¹ Батыршин Д. Сбой в генерации: власти и энергетики назвали причину масштабного отключения электроэнергии в Калининградской области. Режим доступа: <https://klops.ru/kaliningrad/2025-05-03/355948-sboy-v-generatsii-vlasti-i-energetiki-nazvali-prichina-nu-masshtabnogo-otklyucheniya-energoenergii-v-kaliningradskoy-oblasti> (дата обращения: 01.09.2025); Батыршин Д. Массовый блэкаут: в Калининградской области произошла авария на ТЭЦ-2 — администрация Балтийска. Режим доступа: <https://klops.ru/kaliningrad/2025-07-17/361599-massovyy-blekaut-v-kaliningradskoy-oblasti-proizoshla-avariya-na-tets-2-administratsiya-baltiyska> (дата обращения: 01.09.2025).

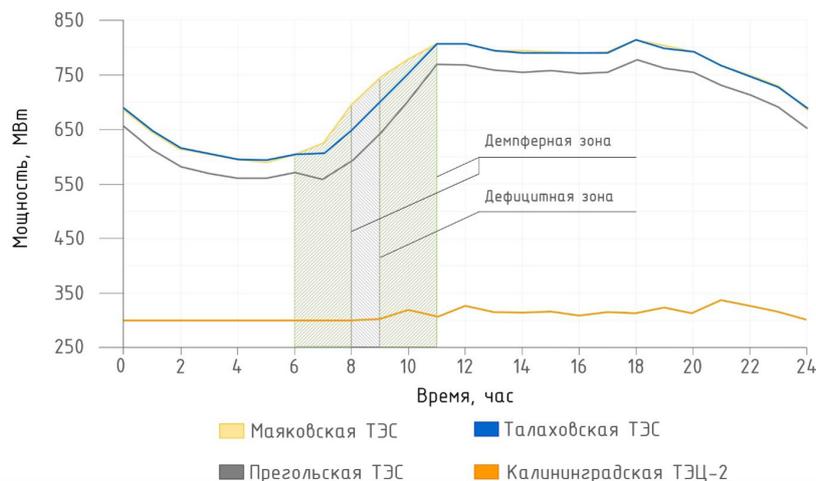


Рис. 2. Типовой вариант распределения нагрузки между электростанциями

Fig. 2. Typical load balancing scenario for power plants

1) Энергетическая безопасность и зависимость от импорта. Высокая зависимость региона от поставок энергоресурсов, в первую очередь природного газа, осуществляемых по трансграничному магистральному газопроводу и через морской терминал сжиженного природного газа, формирует потенциальные уязвимости. Такие логистические цепочки могут быть нарушены по ряду причин (политических, экономических, технических), что потенциально ослабляет энергетическую безопасность области.

2) Оптимизация режимов работы ГТУ. Для выполнения нормативов по оперативному/вращающемуся резерву и покрытия пиков нагрузки (рис. 2, «дефицитная зона») требуется кратковременное включение ГТУ. С учетом времени пуска и выхода на минимально устойчивую нагрузку ввод выполняется заблаговременно: до и сразу после пика формируются «демпферные зоны» ввода и вывода (рис. 2) [6]. Однако, как показывают исследования [7], режим с частыми пусками, остановками и работой приводит к ускоренному сокращению моторесурса ГТУ. Дополнительно недогрузка ГТУ приводит к снижению их фактической топливной эффективности.

3) Стабильность и надежность системы. Работа в изолированном режиме повышает риски, связанные со устойчивостью частоты и напряжения, что влияет на работу ГТУ/ПГУ и в перспективе электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Существующие системы противоаварийной автоматики эффективно справляются с задачей предотвращения полного коллапса системы, но их действие в критических ситуациях по-прежнему сопряжено с необходимостью отключения потребителей. Следовательно, остается необходимость в развитии методов оперативного прогнозирования, интеграции принципиально новых элементов системы, оптимизации и распределения нагрузки между работающими станциями в целях минимизации риска возникновения аварийных ситуаций и более экономичного управления режимами работы энергосистемы [8–10].

В мировой практике малые и островные изолированные энергосистемы, а также энергосистемы территорий Гавайских и Канарских островов, Кипра, Крита, Бонэйр, Шри-Ланки, Саудовской Аравии, отдельных районов Австралии [11–18] рассматриваются как экспериментальные площадки, демонстрируя различные пути решения общих вызовов в области надежности, экономической эффективности и планирования.

Цель работы – провести сравнительный анализ мирового опыта функционирования изолированных энергосистем с учетом их географических и структурно-функциональных особенностей, потенциала ВИЭ и применяемых технологий. Результаты исследования могут быть

использованы при выработке рекомендаций по реструктуризации энергетической системы Калининградской области, повышению ее надежности, стабильности и экономической эффективности в условиях изолированной работы.

Материалы и методы

Основой настоящего исследования является сравнительный анализ, направленный на выявление эффективных методов управления изолированными энергосистемами для Калининградской области.

На первом этапе исследования была сформирована выборка изолированных энергосистем для анализа. Отбор производился на основе критериев для обеспечения релевантности и репрезентативности сравнения:

- степень изоляции: рассматривались исключительно энергосистемы, не интегрированные в общенациональные системы, которые работают или работали в рамках автономной генерации;
- зависимость от импорта топлива: выбирались регионы с ограниченными собственными ископаемыми энергоресурсами, что делает их уязвимыми к внешним поставкам, аналогично ситуации в Калининградской области;
- сопоставимость масштабов: учитывались показатели генерации и нагрузки на сеть, находящиеся в пределах $\pm 30\%$ в сравнении с Калининградской областью, что позволяет проводить аналогии в части управления и резервирования;
- степень развития ВИЭ: для Калининградской области ключевым направлением является использование ветроэнергетического потенциала, оцененного в 600–800 МВт [3, 19], включая офшорные ветропарки, а также другие местные энергетические ресурсы [3]; это создает возможности для снижения зависимости от внешних поставок топлива.

В исследование были включены Гавайские и Канарские острова, Кипр, Крит, Тасмания, Бонэйр, Магаданская область, Сахалин и другие территории, демонстрирующие вариативность в условиях схожих вызовов (табл. 2).

Таблица 2

Сводные данные по рассматриваемым энергосистемам

Table 2

Summary data on the power systems under review

Наименование	Уст. мощность, МВт	Пик потребления, МВт	Население, тыс.	Доля ВИЭ, %	Наличие ресурсов
Калининградская область, РФ	1860	717	1033,9	<1,0	Нет
о. Оаху, США	1973,1	1100	953,2	31	Нет
о. Крит, ЕС	1084,1	684	670,0	28,8	Нет
о. Кипр	2275,5	1243	1358,2	34,98	Нет
о. Тасмания, Австралия	3245,0	1760	576,0	81,0	Гидроресурсы
о. Гран-Канария, ЕС	1287,00	506,1	851,2	24,05	Нет
о. Тенерифе, ЕС	1389,1	558,8	917,8	24,4	Нет
Исландия	2935,7	2800	384,0	99,98	Геотермальные
Магаданская область, РФ	1647,5	432,7	133,4	94	Гидроресурсы

На основании принятых критериев для дальнейшего анализа были отобраны энергосистемы островов Оаху (США), Крит (Греция), Кипр, Тенерифе и Гран-Канария (Испания). Энергосистемы Тасмании, Исландии и Магаданской области были исключены из сравнения ввиду отличий в структуре энергобаланса (доминирование гидро- и геотермальной генерации).

На втором этапе проводились сбор и систематизация данных из открытых источников по каждой из отобранных энергосистем. Использовались рецензируемые статьи и материалы конференций, отчеты системных операторов (Hawaiian Electric, ADMIE, TSOC, Red Eléctrica de España), анализировались отчеты о крупных системных авариях, планы развития сетей, а также доклады отраслевых организаций о технических аспектах функционирования и устойчивости систем.

На третьем этапе проводился их сравнительный анализ в части:

- структуры установленной мощности и энергобаланса, включая типы электростанций и используемые виды топлива;
- достигнутого уровня интеграции ВИЭ и основных технологий, используемых для их подключения. При этом анализ направлен не на сравнение географических и климатических условий или абсолютного потенциала ВИЭ, а на оценку системных эффектов от их уже достигнутой доли и стратегий, которые позволили ее повысить;
- опыта внедрения технологий повышения гибкости и надежности энергосистемы (включая использование технологий высоковольтных линий постоянного тока и системы накопления электроэнергии (СНЭЭ));
- устойчивости к системным возмущениям, которая оценивается на примере анализа крупных аварийных событий и их причин.

Результаты

Гавайский архипелаг, остров Оаху, США

Остров Оаху выбран в качестве примера успешной трансформации, где традиционные углеводородные тепловые электростанции (ТЭС) постепенно заменяются ВИЭ и СНЭЭ. Энергосистема Оаху изолирована от других островов и имеет собственную сетевую инфраструктуру, системообразующая сеть которой выполнена на напряжении 138 кВ (рис. 3)².

Анализ структуры генерирующих мощностей острова Оаху показывает преобладание ТЭС, использующих в качестве энергоресурса нефть. При этом доля ежегодной выработки электроэнергии за счет ВИЭ с 2011 г. достигла к 2024 г. 31%³. Наряду с генерирующими активами, управляемыми оператором энергосистемы (табл. 3), на острове широко внедряется распределенная солнечная генерация на стороне потребителей, установленная мощность которой составляет около 662 МВт. Этот объем мощности не включен в табл. 3, поскольку он относится к неуправляемым, и для энергосистемы он выступает не как прямой источник генерации, а как фактор, снижающий видимую сетевую нагрузку, что, в свою очередь, изменяет график ее покрытия и приводит к снижению общей инерции системы.

Одним из инструментов для обеспечения устойчивости системы при интеграции ВИЭ (высокой доли солнечной генерации) стали СНЭЭ. За последние два десятилетия на Гавайях реализован ряд проектов накопителей энергии на базе аккумуляторных батарей общей мощностью 430,75 МВт и емкостью 1469,83 МВт·ч. Планируется ввод 527,75 МВт и 1985 МВт·ч соответственно⁴. Первый крупный коммерческий проект был введен в 2023 г. – Kapolei Energy Storage (KES) мощностью 135 МВт / 540 МВт·ч для базового покрытия и 50 МВт / 25 МВт·ч для

² Sustainability Report &. Режим доступа: <https://www.hawaiianelectric.com/clean-energy-hawaii/sustainability/sustainability-report-and-maps> (дата обращения: 25.11.2025).

³ Hawaiian Electric. Surges to 36% Renewable Energy on Grids. Режим доступа: <https://www.hawaiianelectric.com/hawaiian-electric-surges-to-36-renewable-energy-on-grids> (дата обращения: 04.04.2025).

⁴ Hawaiian Electric. Renewable Project Status Board. Режим доступа: <https://www.hawaiianelectric.com/clean-energy-hawaii/our-clean-energy-portfolio/renewable-project-status-board> (дата обращения: 04.04.2025).

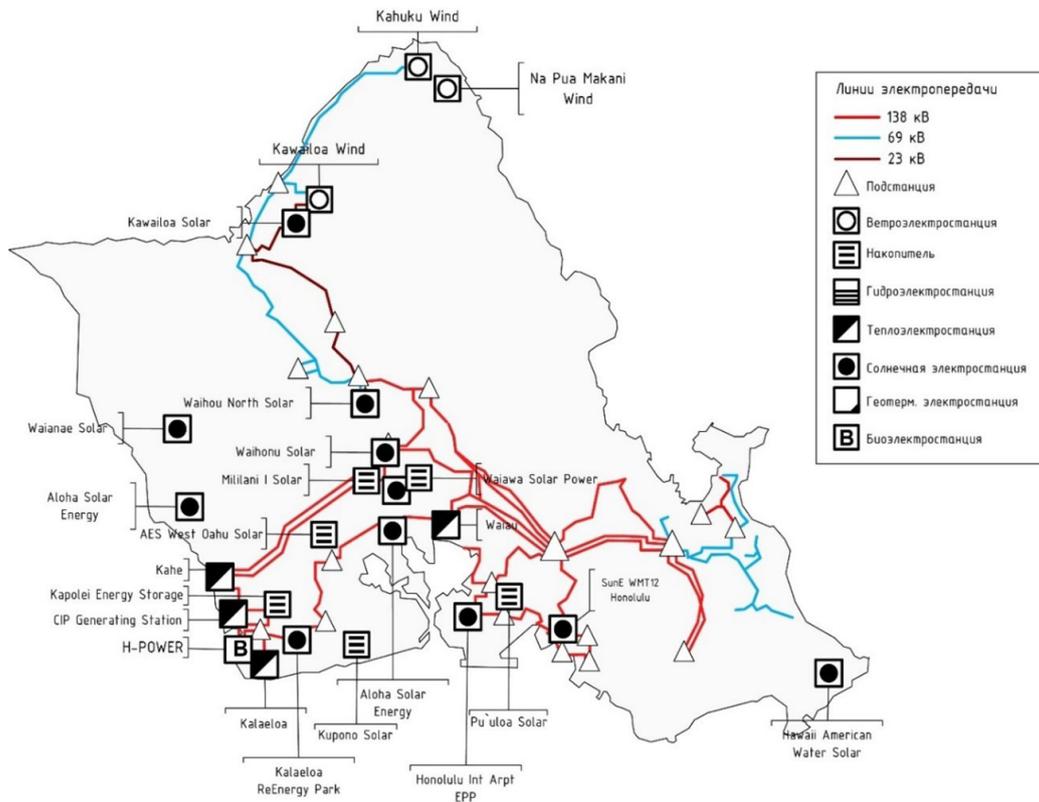


Рис. 3. Карта электроэнергетической инфраструктуры острова Оаху

Fig. 3. Map of Oahu's electricity infrastructure

Таблица 3

Группы генерации на электростанциях острова Оаху

Table 3

Generation groups of Oahu Island power plants

Наименование	Топливо	ПСУ, МВт	ГТУ, МВт	ДГУ, МВт	ПГУ, МВт	Итого, МВт (%)
Kahe Power Plant	Нефть	2×135; 2×81,6; 2×86	—	—	—	605,2 (30,6%)
Kalaeloa Partners	Нефть	—	—	—	1×208	208 (10,54%)
Campbell Industrial Park	Нефть	—	1×129	—	—	129 (6,5%)
Waiau Power Plant	Нефть	2×50; 2×54,4; 2×81,6	2×51,3	—	—	474,6 (24%)
Schofield Barracks	Биодизель	—	6×8,4	—	—	48,6 (2,46%)
H-POWER	ТБО	1×68,5	—	—	—	68,5 (3,4%)
СЭС	—	—	—	—	—	316,2 (16,0%)
ВЭС	—	—	—	—	—	123 (6,23%)
Общая мощность		1045,7 (53%)	280,20 (14,2%)	—	208 (10,5%)	1973,1 (100%)

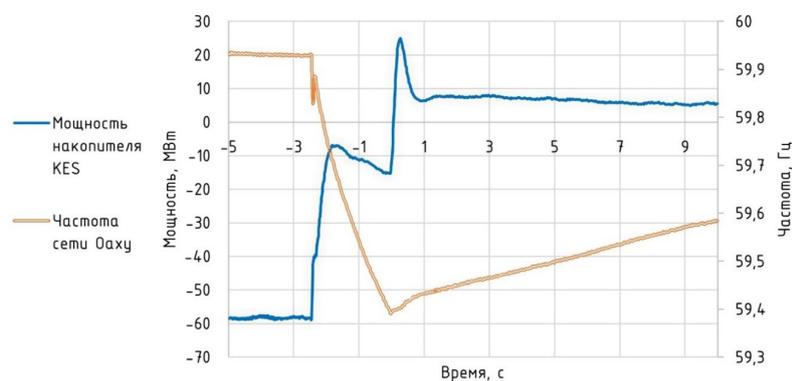


Рис. 4. Реакция KES в рамках стабилизации энергосистемы

Fig. 4. KES response as part of power system stabilization

частотного регулирования. Проект продемонстрировал эффективность в качестве резервного источника в ходе системной аварии 9 февраля 2024 г. Около полудня общая нагрузка системы составляла порядка 500–600 МВт, система KES находилась в режиме зарядки и была готова обеспечить поддержку сети. В 11:27 произошло аварийное отключение блока ПГУ Kahe 5, нагрузка которого составляла 42 МВт, что привело к падению частоты до 59,39 Гц. На отметке 59,70 Гц был инициирован запуск комплекса быстрого управления нагрузкой, который приостановил заряд KES. Через 0,25 секунды после отметки 59,4 Гц KES перешла в режим выдачи активной мощности, что остановило падение частоты. В течение последующего получаса система KES оставалась в работе, что позволило восстановить электроснабжение без отключения потребителей (рис. 4)⁵.

Системные аварии 8 января и 31 июля 2024 г., когда совпали плановые ремонты и неблагоприятные погодные условия, показали, что даже мощные аккумуляторные системы не могут выступать гарантом стабильности при длительном дефиците мощности. В ходе этих событий на фоне проводившихся профилактических ремонтов⁶ аварийные остановы энергоблоков электростанций привели к крупным веерным отключениям. Отмечено, что причиной описанных событий были отказы ТЭС. Это также подтверждается устойчивым ростом частоты внеплановых отказов на традиционных ТЭС⁷, что объясняется старением оборудования и усложнением их эксплуатации в переменном режиме работы. Отмечается – большой объем распределенной генерации у потребителей делает реальную нагрузку непредсказуемой, что снижает эффективность классической ступенчатой автоматической частотной разгрузки. Для решения этой проблемы Hawaiian Electric начала модернизацию схем автоматической частотной разгрузки, переходя к динамическим уставкам к 2028 г.⁸ Описанные события и проблемы подчеркивают необходимость модернизации энергетического оборудования и автоматики, а также более тщательного проектирования систем накопления энергии для обеспечения надежности и стабильности изолированных энергосистем.

Кроме технологических вызовов, ключевой проблемой изолированных энергосистем остается финансовая нагрузка на потребителей. В отличие от других регионов, на архипелаге нет прямых государственных субсидий, выравнивающих цену с материком. Поэтому правительство

⁵ Asano M. An Innovative Clean Energy Integrated Grid Plan for Hawaii. Режим доступа: <https://www.esig.energy/an-innovative-clean-energy-integrated-grid-plan-for-hawaii/> (дата обращения: 04.04.2025).

⁶ Hawai'i Powered. Hawaiian Electric – Integrated Grid Plan. Action Plan Annual Update – 2024. Режим доступа: https://hawaiipowered.com/igpreport/IGP_Action_Plan_Annual_Update_2024-06-24.pdf (дата обращения: 25.11.2025).

⁷ Hawai'i Natural Energy Institute Research Highlights. Grid Integration. Recent Reliability Challenges. Режим доступа: <https://www.hnei.hawaii.edu/wp-content/uploads/Recent-Reliability-Challenges.pdf> (дата обращения: 25.11.2025).

⁸ Oahu DUFLS Update: IGP TAP Transmission Subcommittee. Режим доступа: <https://www.hawaiianelectric.com/a/14824> (дата обращения: 25.11.2025).

Гавайев наряду с развитием сетевых СНЭЭ использует комплекс мер (льготные кредиты, поддержка местных производителей аккумуляторов и т.п.), чтобы сгладить финансовую нагрузку на конечных потребителей [20]. Например, был запущен проект Battery Bonus, направленный на стимулирование домохозяйств к установке частных накопителей за выплаты при передаче излишков электроэнергии в сеть в периоды пикового спроса. В итоге общая мощность подключенных СНЭЭ в рамках программы на Оаху достигла 46,8 МВт⁹.

Таким образом, гавайский опыт служит успешной моделью интеграции ВИЭ и СНЭЭ в условиях изолированной работы. Он демонстрирует не только техническую реализуемость, но и важность комплексного подхода к энергопереходу, включающего модернизацию или замену устаревших мощностей, развитие автоматизированного управления и ВИЭ, а также институциональную поддержку для преодоления технологических и экономических барьеров.

Острова Кипр и Крит, ЕС

Энергосистемы Кипра и Крита структурно схожи: обе зависят от импортного ископаемого топлива, имеют ограниченное количество крупных ТЭС и, как следствие, низкую инерционность системы, что затрудняет интеграцию ВИЭ. Для смягчения экономической нагрузки в случае Крита (как и в Калининградской области) используются механизмы государственного субсидирования тарифов. Системообразующая сеть энергосистемы Крита реализована на напряжении 150 кВ, Кипра – на напряжениях 220, 132 и 66 кВ (рис. 5)¹⁰.

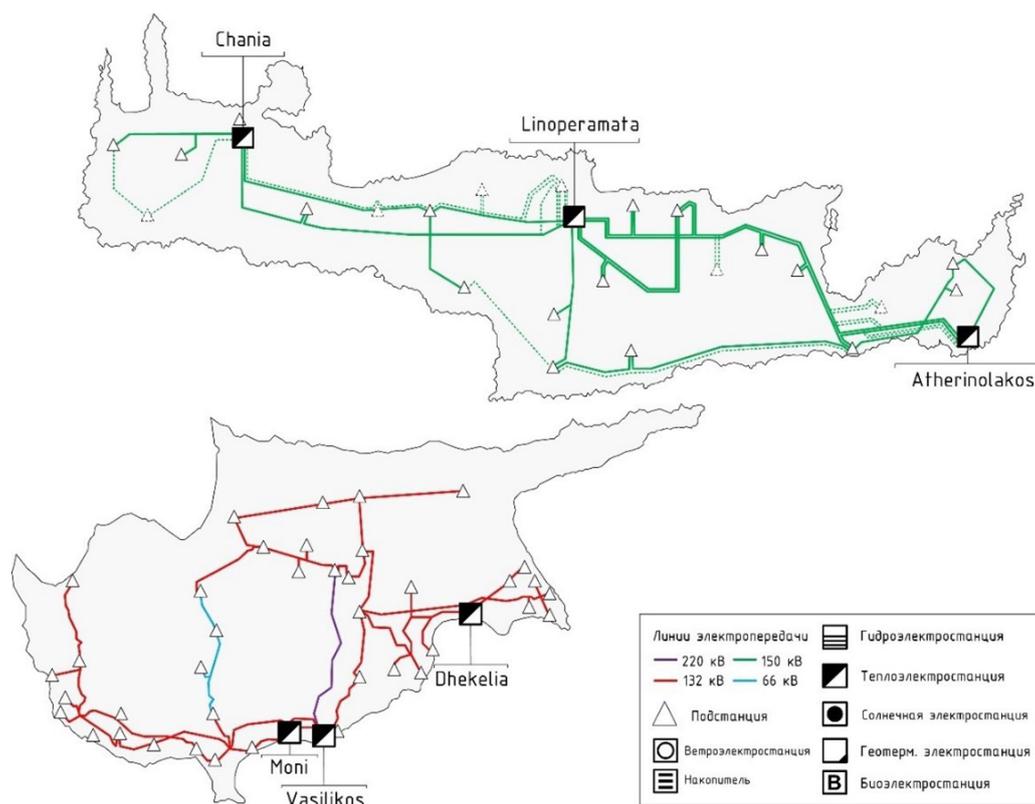


Рис. 5. Карта электроэнергетической инфраструктуры островов Крит и Кипр

Fig. 5. Map of the electricity infrastructure of the Crete and Cyprus Islands

⁹ Hawaiian Electric. Battery Bonus Program. Режим доступа: <https://www.hawaiianelectric.com/products-and-services/customer-incentive-programs/battery-bonus> (дата обращения: 04.04.2025).

¹⁰ ADMIE. Ten-Year Development Plan. Режим доступа: <https://www.admie.gr/en/grid/development/ten-year-development-plan#collapse-accordion-74-1> (дата обращения: 04.04.2025); Ετήσια Έκθεση 2023. Режим доступа: https://www.edpb.europa.eu/about-edpb/about-edpb/annual-reports_el (дата обращения: 25.11.2025).

Около 70% совокупного электропотребления островов обеспечивается тремя крупными ТЭС на каждом острове. Несмотря на значительный технический потенциал ВИЭ в данных регионах [13], их фактическая доля в структуре выработки электроэнергии остается ограниченной, составляя 28,8% на Крите и 34,98% на Кипре. Ключевым ограничивающим фактором для дальнейшего наращивания доли ВИЭ выступает негативное влияние на надежность и устойчивость функционирования изолированных энергосистем [14], поэтому основу генерирующих мощностей составляют ТЭС (табл. 4)¹¹.

Таблица 4

Группы генерации, установленные на островах Кипр и Крит

Table 4

Generation groups installed on the Cyprus and Crete Islands

Наименование	Топливо	ПСУ, МВт	ГТУ, МВт	ДГУ, МВт	ПГУ, МВт	Итого, МВт (%)
<i>Остров Крит</i>						
Linoperamata	Нефть	2×15; 3×25	1×14,7; 1×28; 1×44	2×12,3	–	216,3 (20%)
Chania	Нефть	–	1×20; 2×30; 2×59,4	–	1×132	330,8 (30,5%)
Atherinolakos	Нефть	2×50	–	1×22,5; 2×51,1	–	224,7 (20,7%)
СЭС	–	–	–	–	–	102 (9,4%)
ВЭС	–	–	–	–	–	210 (19,4%)
Общая мощность		205 (18,9%)	285,5 (26,34%)	149,3 (13,7%)	132 (12,2%)	1084,1 (100%)
<i>Остров Кипр</i>						
Dhekelia	Нефть	6×60	–	2×51	–	462 (20,3%)
Moni	Нефть	–	4×37,5	–	–	150 (6,6%)
Vasilikos	Нефть	3×130	1×37,5	–	2×220	867,5 (38,1%)
СЭС	–	–	–	–	–	638 (28,0%)
ВЭС	–	–	–	–	–	158 (6,9%)
Общая мощность		750 (32,9%)	187,5 (8,24%)	102 (4,5%)	440 (19,3%)	2275,5 (100%)

Энергосистемы островов характеризуются относительно небольшими масштабами, ограниченным количеством маневренных генерирующих мощностей и пониженной системной инерционностью. Такие особенности приводят к трудностям в обеспечении устойчивой интеграции большой доли ВИЭ, особенно в условиях отсутствия дополнительных компенсирующих мощностей, таких как ГАЭС или СНЭЭ. Для иллюстрации указанных особенностей и их влияния на устойчивость энергосистем в аварийных ситуациях рассмотрим поведение энергосистемы острова Крит в ходе отключения паросилового агрегата мощностью 35 МВт, которое произошло 24 октября 2018 г. в 9:00 по местному времени (рис. 6)¹². Нагрузка в момент аварии составляла

¹¹ ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2023–2032: Τεύχος Παραρτημάτων. Αθήνα: Διεύθυνση Στρατηγικής & Σχεδιασμού Ανάπτυξης Συστήματος, 2022. 132 σ.

¹² Crete Power System Antiopi Gigantidou – Hellenic Electricity Distribution Network Operator, Greece. Режим доступа: https://hybridpowersystems.org/wp-content/uploads/sites/13/2019/06/1_4_HYB19_079_presentation_Gigantidou_Antiopi.pdf (дата обращения: 04.04.2025).

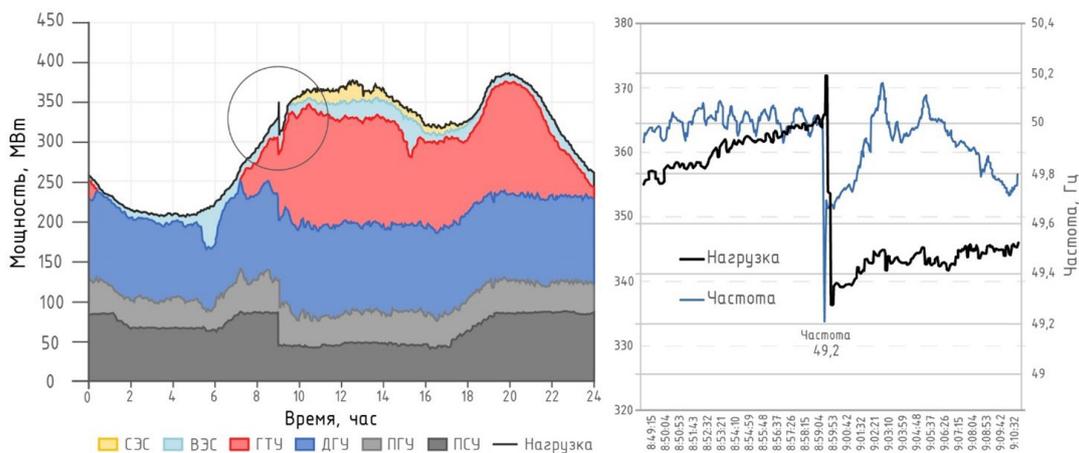


Рис. 6. Авария в энергосистеме острова Крит

Fig. 6. Incident in the power system of the Crete Island

370 МВт. В момент потери генерации частота в энергосистеме упала до 49,2 Гц (от номинальных 50 Гц), что привело к срабатыванию противоаварийной автоматики и отключению части потребителей.

Восстановление номинальной частоты в энергосистеме потребовало форсированного перераспределения нагрузки на более маневренные ГТУ. Схожие оперативные стратегии, основанные на использовании ГТУ и противоаварийной автоматики для устранения небалансов мощности, применяются в энергосистеме Кипра. Однако, несмотря на высокую скорость пуска и способность к быстрому изменению выдаваемой мощности, ГТУ ограничены в быстродействии при компенсации резких отклонений частоты, возникающих при авариях. Поэтому использование ГТУ и противоаварийной автоматики, хотя и обеспечивает текущую устойчивость систем, не является оптимальным долгосрочным решением в условиях нарастающей интеграции ВИЭ.

Фундаментальным подходом к повышению надежности, устойчивости и экономической эффективности функционирования изолированных энергосистем является их интеграция с более крупными энергетическими объединениями посредством межсистемных связей. В настоящее время активно реализуется проект объединения электрических сетей Крита и континентальной Греции путем прокладки подводных кабельных линий [15]. На первом этапе введены линии переменного тока 150 кВ мощностью 2×200 МВт. Функциональная значимость данной межсистемной связи для повышения динамической устойчивости и надежности энергоснабжения Крита была неоднократно подтверждена в условиях аварийных ситуаций. В частности, 3 июля 2021 г. после аварийного отключения генерирующей мощности в объеме 150 МВт на электростанции Ханья (Chania) данная линия обеспечила необходимую поддержку, существенно ускорив процесс восстановления нормального режима работы энергосистемы¹³. На втором этапе будет введена линия постоянного тока мощностью 700 МВт (2×350 МВт). Завершение этой связи создаст необходимую инфраструктурную основу для реализации более крупного проекта – Euro-Asia Interconnector. Он направлен на формирование транснациональной электрической связи, объединяющей энергосистемы Европейского Союза (через Крит и Грецию), Кипра и Израиля. Структурная схема этого международного проекта с пропускной способностью 1000 МВт (в первой фазе) на каждом участке представлена на рис. 7.

¹³ ADMIE. Successful Power Supply to Crete through Interconnection. Режим доступа: <https://www.admie.gr/en/kentro-typoy/press-releases/successful-power-supply-crete-through-iptos-new-interconnection> (дата обращения: 04.04.2025).

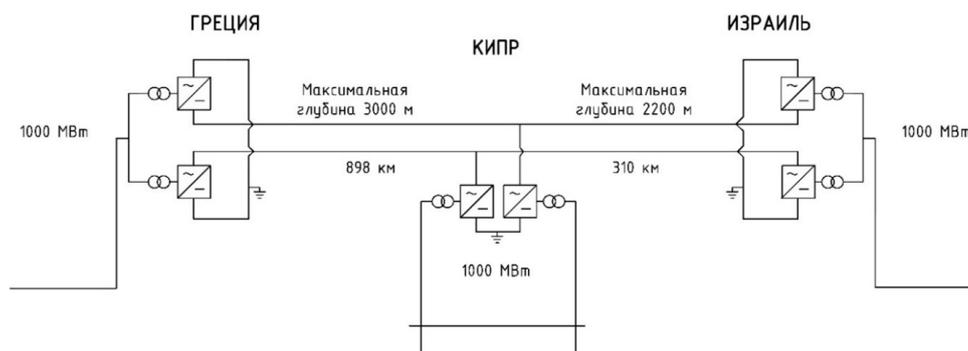


Рис. 7. Межсистемная связь Euro-Asia Interconnector

Fig. 7. Euro-Asia Interconnector link

Подобная инициатива является решением сразу ряда проблем. В частности, обеспечивается возможность гибкого импорта/экспорта электроэнергии, что способствует оптимизации режимов работы и снижению эксплуатационных затрат; повышается общая надежность и устойчивость энергоснабжения; снижается критическая зависимость от ископаемых видов топлива. Кроме того, формируются благоприятные технико-экономические условия для безопасной и эффективной интеграции больших объемов ВИЭ.

Острова Тенерифе и Гран-Канария, Испания

Рассмотрение энергетических систем Тенерифе и Гран-Канарии демонстрирует специфические проблемы управления, возникающие в условиях высокой концентрации генерирующих мощностей на ограниченном числе крупных объектов. Экономическая структура островов в значительной степени определена развитием туристической отрасли, что обуславливает характерные пики и сезонные колебания электропотребления. Системообразующая электрическая сеть на обоих островах базируется на линиях электропередачи классов напряжения 220 кВ и 66 кВ. Топология сетей и размещение ключевых объектов представлены на рис. 8¹⁴.

Регион обладает значительным потенциалом для развития ветровых и солнечных электростанций. За последние 12 лет на Канарах наблюдается постепенный рост доли ВИЭ в производстве электроэнергии (с 5,7% до 19,8%) и ожидается, что этот показатель продолжит расти¹⁵. Оставшуюся долю покрывают электростанции на ископаемом топливе (табл. 5).

Данные, представленные в табл. 5, отражают высокую степень концентрации мощности: более 50% суммарной установленной мощности на каждом из островов приходится на один энергообъект – ТЭС Granadilla на Тенерифе и ТЭС Barranco Tirajana на Гран-Канарии. Такая структурная особенность повышает уязвимость энергосистем к единичным отказам крупных блоков или ключевых элементов сети. Иллюстрацией данной уязвимости служит крупная системная авария, произошедшая в энергосистеме Тенерифе 29 сентября 2019 г. (рис. 9)¹⁶.

Согласно отчету энергетической компании, инициирующим событием аварии стал отказ трансформатора напряжения на системообразующей подстанции. Первичное однофазное короткое замыкание было устранено действием релейной защиты, однако спустя чуть более секунды, предположительно из-за задымления поврежденного трансформатора напряжения, возникло вторичное замыкание в разъединителе, переросшее в трехфазное короткое замыкание. Развитие аварийного процесса привело к потере подстанции и каскадному отключению восьми линий электропередачи и двух трансформаторов.

¹⁴ Anuario Energéticos de Canarias. Режим доступа: <https://www.gobiernodecanarias.org/energia/materias/anuarios-energeticos/> (дата обращения: 25.11.2025).

¹⁵ Там же

¹⁶ Informe incidente Tenerife 29 septiembre 2019. Режим доступа: <https://www.esios.ree.es/es/documentacion/informe-incidente-tenerife-29-septiembre-2019> (дата обращения: 04.04.2025).

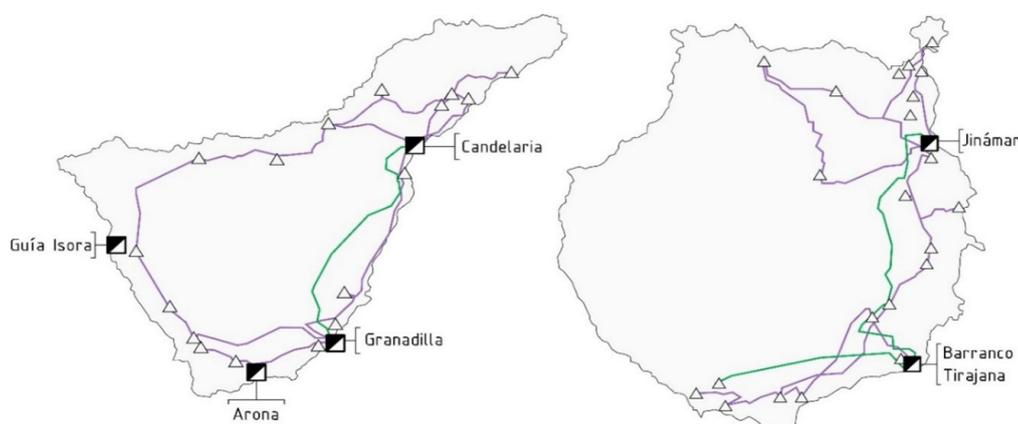


Рис. 8. Карта электроэнергетической инфраструктуры островов Тенерифе и Гран-Канария

Fig. 8. Map of the electricity infrastructure of Tenerife and Gran-Canaria

Таблица 5

Группы генерации на островах Тенерифе и Гран-Канария

Table 5

Generation groups of the Tenerife and Gran-Canaria Islands

Наименование	Топливо	ПСУ, МВт	ГТУ, МВт	ДГУ, МВт	ПГУ, МВт	Итог, МВт (%)
<i>Остров Тенерифе</i>						
Candelaria	Нефть	2×40	2×37,5; 1×17	3×12	—	205 (14,97%)
Granadilla	Нефть	2×80	1×37; 1×42	2×24	1×226; 1×235	744 (53,85%)
Guía Isora	Нефть	—	2×22	—	—	44 (3,17%)
Arona	Нефть	—	2×25	—	—	50 (3,60%)
СЭС	—	—	—	—	—	116,5 (8,4%)
ВЭС	—	—	—	—	—	222,6 (16%)
Общая мощность		240 (22,86%)	265 (25,24%)	84 (8%)	461 (43,9%)	1389,1 (100%)
<i>Остров Гран-Канария</i>						
Jinámar	Нефть	2×60	1×23,5; 2×37,5	3×12; 2×24	—	302,5 (23%)
Barranco Tirajana	Нефть	2×80	2×37,5	—	2×230	695 (52,92%)
СЭС	—	—	—	—	—	77,5 (5,9%)
ВЭС	—	—	—	—	—	238,4 (18,1%)
Общая мощность		280 (28,1%)	173,5 (17,39%)	84 (8,4%)	460 (46,1%)	1313,4 (100%)

Во время короткого замыкания на шинах синхронные генераторы системы ускорились из-за невозможности выдать генерируемую мощность при низком напряжении. Сразу после устранения короткого замыкания частота кратковременно поднялась до 50,63 Гц, но затем, вследствие отключения крупных энергоблоков, началось лавинообразное падение частоты (со скоростью до 5,4 Гц/с). Частота достигла критического уровня 36,4 Гц спустя примерно 5 секунд после возникновения короткого замыкания на шинах. Столь высокая скорость падения частоты сделала невозможным удержание синхронизма оставшимися генераторами.

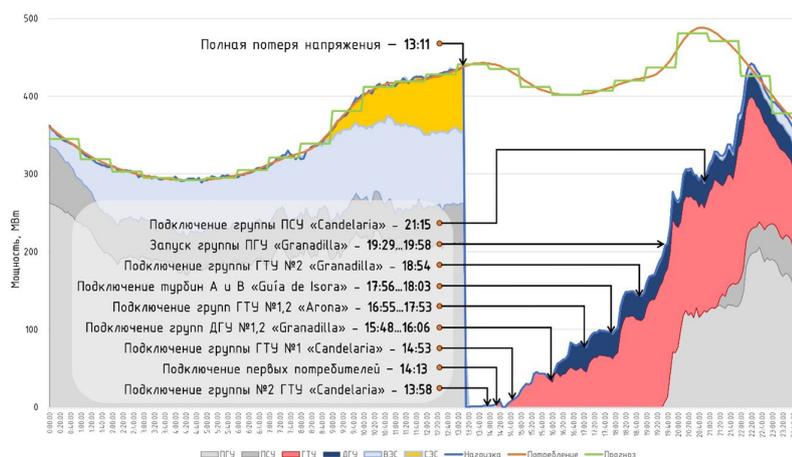


Рис. 9. Динамика изменения генерации в рамках системной аварии

Fig. 9. Dynamics of generation changes within an incident

Подобные аварии наглядно демонстрируют проблемы, присущие изолированным энергосистемам с высокой концентрацией генерации: повышенную чувствительность частоты к небалансам активной мощности и ограниченные возможности системы по демпфированию крупных возмущений. Это подчеркивает необходимость внедрения технологических и системных решений, способных обеспечить быстродействующее регулирование частоты.

Для решения проблем рассматриваемых энергосистем было принято решение о развитии межсетевых электрических связей. В 2021 г. правительство Канар открыло проект первой двухцепной подземно-подводной кабельной линии с напряжением 66 кВ и пропускной способностью 50 МВА между островами Тенерифе и Ла-Гомера¹⁷. Данная связь не только позволит повысить устойчивость обеих энергосистем, но и создаст условия для более эффективного использования избыточной генерации ВИЭ на Ла-Гомере. В долгосрочной перспективе рассматривается более крупный проект – создание межсистемной связи между Тенерифе и Гран-Канарией к 2030 г. Результаты моделирования показывают, что реализация данного проекта позволит увеличить оптимальный уровень увеличения доли ВИЭ в суммарном энергобалансе островов до 70% и выше, а также снизить стоимость производства электроэнергии на 15–30% [21].

Наряду с развитием межсетевых связей на Гран-Канарии реализуется проект по созданию крупномасштабной системы накопления энергии: ГАЭС Chira-Soria установленной мощностью 200 МВт и емкостью водохранилищ, эквивалентной 3,2 ГВт·ч запасенной энергии. Согласно результатам предварительных расчетов [12], ГАЭС Chira-Soria предоставит гибкий инструмент, который обеспечит необходимые резервы мощности и позволит существенно увеличить допустимую долю интеграции ВИЭ в энергосистеме Гран-Канарии с текущего уровня до прогнозируемых 49–51% к 2030 г.

Обсуждение

Энергосистема Калининградской области сформирована в условиях ограниченного доступа к технологическим ресурсам и геополитической нестабильности, усугубленной выходом стран Балтии из ЕЭС/ОЭС (IPS/UPS). Несмотря на текущую самодостаточность и функциональную автономность системы, остаются возможности для повышения надежности и оптимизации парка генерирующего оборудования, с целью повышения ее эффективности.

¹⁷ Red Eléctrica de España. Finaliza Subestación Chío – Interconexión Tenerife-Gomera. Режим доступа: <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa-interconexiones-transicion-ecologica/2025/01/red-electrica-finaliza-subestacion-chio-interconexion-tenerife-gomera> (дата обращения: 04.04.2025).

Сравнительный анализ пяти изолированных энергосистем – Оаху (США), Кипра, Крита (ЕС), Тенерифе и Гран-Канарии (Испания) – выявил общие для «энергетических островов» закономерности, релевантные для Калининградской области. Сходные выводы приводятся в [22], где отмечается, что, несмотря на климатические различия, подходы к энергообеспечению во многом совпадают: основная стратегия – повышение энергоэффективности и управление спросом; ключевая задача – выбор оптимальной архитектуры изолированной энергосистемы с применением технологий, повышающих гибкость сети при минимальных затратах и выбросах; приоритеты – развитие распределенной генерации, высокая доля ВИЭ и софинансирование.

Межсистемные связи, примером реализации которых служат Крит и Канары, повышают надежность, экономическую эффективность и возможности интеграции ВИЭ, однако их реализация для Калининградской области в текущих условиях не рассматривается. Опыт Гавайев, Австралии и других систем демонстрирует – СНЭЭ на базе аккумуляторов способны предоставлять ключевые системные услуги для обеспечения динамической устойчивости и частотного регулирования, что также подтверждено в работе [23]: показано увеличение запаса динамической устойчивости, предельного времени отключения короткого замыкания и допустимой выдачи мощности станции при корректной коммутации накопителей.

Исходя из проведенного анализа, среднесрочным приоритетом реструктуризации энергетического комплекса Калининградской области следует считать развитие локальных источников генерации (распределенные ВИЭ и объекты утилизации твердых бытовых отходов) в связке с аккумуляторными СНЭЭ. Этому способствуют два ключевых фактора: наличие в регионе производства литий-ионных аккумуляторных батарей РЭНЕРО, формирующего производственно-технологическую базу для развертывания накопителей, и значительный, хотя пока слабо освоенный, потенциал ВИЭ, эффективность интеграции которого может быть повышена за счет СНЭЭ. Второй локальный источник – утилизация твердых бытовых отходов. По расчетам [3], полная переработка 350 тыс. т/год обеспечивает около 0,175 млрд кВт·ч/год электроэнергии ($\approx 3,5\%$ потребности региона) и 0,34–0,4 млн Гкал/год тепла; в сочетании с вводом ВЭС 110 МВт ($\approx 0,3$ млрд кВт·ч/год) можно снизить зависимость от привозных энергоресурсов и улучшить экологические показатели региона. С целью обеспечения динамической устойчивости энергосистем необходим накопитель на аккумуляторных батареях мощностью 110 МВт и емкостью 260 МВт·ч при времени разряда 2,4 часа или емкостью 54 МВт·ч при времени разряда 0,5 часа [24].

Даже при умеренных темпах развития ВИЭ внедрение СНЭЭ открывает дополнительные возможности для оптимизации режимов работы существующего генерирующего комплекса. В частности, накопители могут быть эффективно использованы для частичного или полного замещения функций ГТУ при покрытии пиковой части графика нагрузки и предоставлении оперативных резервов мощности; снижение количества пусковых циклов ГТУ уменьшит их износ и эксплуатационные расходы.

Эффективность внедрения СНЭЭ определяется оптимальным выбором параметров – мощности, емкости, скорости реакции и места размещения; эта многокритериальная задача должна учитывать перспективный энергобаланс с учетом ВИЭ и снижения общей системной инерции. Параметры СНЭЭ должны обеспечивать выполнение системных требований по резервированию мощностей и регулированию частоты; необходимо рассмотреть наиболее вероятные режимы, включая плановые ремонты и аварийные отключения крупнейших энергоблоков.

Заключение

1. Обоснован комплекс критериев отбора (степень изоляции, зависимость от импорта топлива, сопоставимость масштабов, уровень интеграции ВИЭ) изолированных энергосистем, сопоставимых с энергосистемой Калининградской области, для их сравнительного анализа.

2. Предложена методика анализа изолированных энергосистем и выполнено исследование, охватывающие структуру генерации, используемых технологий, нормальных и аварийных режимов пяти систем, сопоставимых с энергосистемой Калининградской области, что позволило сформировать научно обоснованную реструктуризацию генерирующего комплекса энергосистемы Калининградской области с целью повышения ее эффективности и надежности при работе в изолированном режиме.

3. В работах [3, 24] научно обоснованы первоочередные проекты реструктуризации генерирующего комплекса: утилизация твердых бытовых отходов (350 тыс. т/год), образующаяся в Калининградской области; возведение ветроэлектростанции мощностью 110 МВт, а также накопителя мощностью 110 МВт и энергоемкостью до 260 МВт·ч для обеспечения динамической устойчивости и эффективности энергосистемы; снижение числа пусковых циклов ГТУ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Хондошко Ю.В., Воробьев А.А.** Технологически изолированные энергосистемы России // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2023. № 101. С. 88–91. DOI: 10.22250/20730268_2023_101_88

[2] **Шутов И.В.** Проблемы обеспечения энергетической безопасности изолированных территорий Российской Федерации // Региональная и отраслевая экономика. 2023. № 1. С. 58–65. DOI: 10.47576/2949-1916_2023_1_58

[3] **Белей В.Ф., Коцарь Г.В.** Энергетика Калининградской области: переход к изолированному режиму работы и оценка перспектив развития // Электричество. 2025. № 5. С. 16–27. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-5-16-27

[4] **Андранович Б., Жуков А.В., Курилкин А.И., Миляев Р.Г., Павлушко С.А., Сацук Е.И., Шаров Ю.В.** Особенности реализации управляющих воздействий противоаварийной автоматики на отключение нагрузки в энергосистеме Калининградской области // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2020. Т. 82, № 1. С. 26–35.

[5] **Андранович Б., Аюев Б.И., Грабчак Е.П., Жуков А.В., Лисицын А.А., Павлушко С.А., Сацук Е.И., Черезов А.В.** Противоаварийное управление в изолированно работающих энергосистемах // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2020. Т. 82, № 1. С. 19–25.

[6] **Аюев Б.И., Бинько Г.Ф., Герасимов А.С., Гуриков О.В., Жуков А.В., Миляев Р.Г., Павлушко С.А., Смирнов А.Н.** Особенности регулирования частоты и перетоков мощности в изолированно работающих энергосистемах // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2020. Т. 82, № 1. С. 124–130.

[7] **Аминов Р.З., Кожевников А.И.** Влияние переменных режимов работы и пуско-остановочных операций на выработку ресурса газовых турбин // Труды Академэнерго. 2017. № 4. С. 58–66.

[8] **Герасимов А.С., Измайлов Р.К., Лисицын А.А.** Развитие средств режимного и противоаварийного управления энергосистем // Энергетика будущего: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 80-летию проф. Ф.Р. Исмагилова. 2024. С. 7–12.

[9] **Бончук И.А., Ерохин П.М.** Оперативное прогнозирование потребления мощности в изолированных энергосистемах // Электричество. 2022. № 1. С. 24–34. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-1-24-34

[10] **Бончук И.А., Шапошников А.П., Ерохин П.М., Созинов М.А.** Оптимизация режимов работы электростанций в изолированных электроэнергетических системах // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2021. № 4. С. 16–25. DOI: 10.34831/EP.2021.1077.4.004

[11] **Stein K., Tun M., Musser K., Rocheleau R.** Evaluation of a 1 MW, 250 kW-hr battery energy storage system for grid services for the Island of Hawaii, *Energies*, 11 (12) (2018) 3367. DOI: 10.3390/en11123367

- [12] **Lozano Medina J.C., Mendieta Pino C.A., Ramos Martín A., León Zerpa F.** A case study of a reverse osmosis based pumped energy storage plant in Canary Islands, *Water*, 4 (16) (2024) 515. DOI: 10.3390/w16040515
- [13] **Karapidakis E., Kalogerakis C., Pompodakis E.** Sustainable power generation expansion in island systems with extensive RES and energy storage, *Inventions*, 8 (5) (2023) 127. DOI: 10.3390/inventions8050127
- [14] **Akçaba S., Eminer F.** Sustainable energy planning for the aspiration to transition from fossil energy to renewable energy in Northern Cyprus, *Heliyon*, 8 (6) (2022) e09813. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09813
- [15] **Vourdoubas J.** The interconnection of the electric grid in the Island of Crete, Greece, and its contribution to the clean energy transition, *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 4 (6) (2023) 1–9. DOI: 10.24018/ejgeo.2023.4.6.429
- [16] **Als Salman A.S., Alharbi T., Mahfouz A.A.** Enhancing the stability of an isolated electric grid by the utilization of energy storage systems: A case study on the Rafha grid, *Sustainability*, 15 (17) (2023) 13269. DOI: 10.3390/su151713269
- [17] **Hamilton J., Negnevitsky M., Wang X., Semshchikov E.** The role of low-load diesel in improved renewable hosting capacity within isolated power systems, *Energies*, 13 (16) (2020) 4053. DOI: 10.3390/en13164053
- [18] **Hoke A., Gevorgian V., Shah S., Koralewicz P., Kenyon R.W., Kroposki B.** Island power systems with high levels of inverter-based resources: Stability and reliability challenges, *IEEE Electrification Magazine*, 9 (1) (2021) 74–91. DOI: 10.1109/MELE.2020.3047169
- [19] **Коцарь Г.В.** Определение перспективных площадок размещения ветроэлектростанций при помощи геоинформационных систем на примере Калининградской области // *Промышленная энергетика*. 2022. № 8. С. 49–59. DOI: 10.34831/EP.2022.58.12.006
- [20] **Wu D., Ma X., Balducci P., Bhatnagar D.** An economic assessment of behind-the-meter photovoltaics paired with batteries on the Hawaiian Islands, *Applied Energy*, 286 (2021) 116550. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116550
- [21] **Qiblawey Y., Alassi A., ul Abideen M.Z., Bañales S.** Techno-economic assessment of increasing the renewable energy supply in the Canary Islands: The case of Tenerife and Gran Canaria, *Energy Policy*, 162 (2022) 112791. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112791
- [22] **Лихачев В.Л.** Зарубежный опыт решения проблем энергоснабжения удаленных и изолированных районов. Режим доступа: <https://ur.hse.ru/mirror/pubs/share/414890489.pdf> (дата обращения: 25.09.2025).
- [23] **Беляев А.Н., Вернер М.Е., Захарян Е.А., Сорокин Е.В.** Повышение запасов динамической устойчивости на основе использования систем накопления энергии // *Известия НТЦ Единой энергетической системы*. 2024. Т. 90, № 1. С. 46–55.
- [24] **Рзай А.А., Белей В.Ф.** Выбор накопителя на базе аккумуляторных батарей для Калининградской энергосистемы // *Вестник молодежной науки*. 2020. Т. 5, № 3. С. 12. DOI: 10.46845/2541-8254-2020-2(24)-13-13

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВЕСЕЛОВСКИЙ Кирилл Константинович – аспирант, Калининградский государственный технический университет, без степени.

E-mail: weselkirill@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6699-2458>

БЕЛЕЙ Валерий Феодосиевич — *заведующий кафедрой энергетики, профессор, Калининградский государственный технический университет, д-р техн. наук.*

E-mail: vbeley@klgtu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4086-6936>

REFERENCES

- [1] **Yu.V. Khondoshko, A.A. Vorobyov**, Technologically isolated energy systems of Russia, *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki [Amur State University Bulletin. Series: Natural and Economic Sciences]*, 101 (2023) 88–91. DOI: 10.22250/20730268_2023_101_88
- [2] **I.V. Shutov**, Problems of ensuring energy security of isolated territories of the Russian Federation, *Regional and Sectoral Economy*, 1 (2023) 58–65. DOI: 10.47576/2949-1916_2023_1_58
- [3] **V.F. Beley, G.V. Kotsar'**, Power system of the Kaliningrad Region: Transition to isolated operation and assessment of development prospects, *Elektrichestvo*, 5 (2025) 16–27. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-5-16-27
- [4] **B. Andranovich, A.V. Zhukov, A.I. Kurilkin, R.G. Milyaev, S.A. Pavlushko, E.I. Satsuk, Yu.V. Sharov**, Features of the load shedding in the power system of the Kaliningrad region, *Izvestiia NTC Edinoi energeticheskoi sistemy [News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System]*, 1 (82) (2020) 26–35.
- [5] **B. Andranovich, B.I. Ayuev, E.P. Grabchak, A.V. Zhukov, A.A. Lisitsyn, S.A. Pavlushko, E.I. Satsuk, A.V. Cherezov**, Emergency control in isolated power systems, *Izvestiia NTC Edinoi energeticheskoi sistemy [News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System]*, 1 (82) (2020) 19–25.
- [6] **B.I. Ayuev, G.F. Binko, A.S. Gerasimov, O.V. Gurikov, A.V. Zhukov, R.G. Milyaev, S.A. Pavlushko, A.N. Smirnov**, Peculiarities of frequency and power flow control in isolated power systems, *Izvestiia NTC Edinoi energeticheskoi sistemy [News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System]*, 1 (82) (2020) 124–130.
- [7] **R.Z. Aminov, A.I. Kozhevnikov**, Influence of variable operating modes, starting and stopping operations on resource generation gas turbines, *Transactions of Academenergo*, 4 (2017) 58–66.
- [8] **A.S. Gerasimov, R.K. Izmailov, A.A. Lisicyn**, *Razvitie sredstv rezhimnogo i protivovariinogo upravleniia energosistem [Development of means for operational and emergency management of power systems]*, *Energetika budushchego: sbornik statei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferencii, posviashchennoi 80-letiiu prof. F.R. Ismagilova [Energy of the Future: A Collection of Articles from the All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 80th Anniversary of Professor F.R. Ismagilov]*, (2024) 7–12.
- [9] **I.A. Bonchuk, P.M. Erokhin**, Operational forecasting of power consumption in isolated power systems, *Elektrichestvo*, 1 (2022) 24–34. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-1-24-34
- [10] **I.A. Bonchuk, A.P. Shaposhnikov, P.M. Erokhin, M.A. Sozinov**, Optimization of operating modes of power plants in isolated power systems. *Izvestiia NTC Edinoi energeticheskoi sistemy [News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System]*, 4 (2021) 16–25. DOI: 10.34831/EP.2021.1077.4.004
- [11] **K. Stein, M. Tun, K. Musser, R. Rocheleau**, Evaluation of a 1 MW, 250 kW-hr battery energy storage system for grid services for the Island of Hawaii, *Energies*, 11 (12) (2018) 3367. DOI: 10.3390/en11123367
- [12] **J.C. Lozano Medina, C.A. Mendieta Pino, A. Ramos Martín, F. León Zerpa**, A case study of a reverse osmosis based pumped energy storage plant in Canary Islands, *Water*, 4 (16) (2024) 515. DOI: 10.3390/w16040515
- [13] **E. Karapidakis, C. Kalogerakis, E. Pompodakis**, Sustainable power generation expansion in island systems with extensive RES and energy storage, *Inventions*, 8 (5) (2023) 127. DOI: 10.3390/inventions8050127

- [14] **S. Akçaba, F. Eminer**, Sustainable energy planning for the aspiration to transition from fossil energy to renewable energy in Northern Cyprus, *Heliyon*, 8 (6) (2022) e09813. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09813
- [15] **J. Vourdoubas**, The interconnection of the electric grid in the Island of Crete, Greece, and its contribution to the clean energy transition, *European Journal of Environment and Earth Sciences*, 4 (6) (2023) 1–9. DOI: 10.24018/ejgeo.2023.4.6.429
- [16] **A.S. Alsalman, T. Alharbi, A.A. Mahfouz**, Enhancing the stability of an isolated electric grid by the utilization of energy storage systems: A case study on the Rafha grid, *Sustainability*, 15 (17) (2023) 13269. DOI: 10.3390/su151713269
- [17] **J. Hamilton, M. Negnevitsky, X. Wang, E. Semshchikov**, The role of low-load diesel in improved renewable hosting capacity within isolated power systems, *Energies*, 13 (16) (2020) 4053. DOI: 10.3390/en13164053
- [18] **A. Hoke, V. Gevorgian, S. Shah, P. Koralewicz, R.W. Kenyon, B. Kroposki**, Island power systems with high levels of inverter-based resources: Stability and reliability challenges, *IEEE Electrification Magazine*, 9 (1) (2021) 74–91. DOI: 10.1109/MELE.2020.3047169
- [19] **G.V. Kotsar'**, Determination of promising sites for setting wind power plants using geo-information systems on the example of the Kaliningrad region, *Industrial Power Engineering*, 8 (2022) 49–59. DOI: 10.34831/EP.2022.58.12.006
- [20] **D. Wu, X. Ma, P. Balducci, D. Bhatnagar**, An economic assessment of behind-the-meter photovoltaics paired with batteries on the Hawaiian Islands, *Applied Energy*, 286 (2021) 116550. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116550
- [21] **Y. Qiblawey, A. Alassi, M.Z. ul Abideen, S. Bañales**, Techno-economic assessment of increasing the renewable energy supply in the Canary Islands: The case of Tenerife and Gran Canaria, *Energy Policy*, 162 (2022) 112791. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.112791
- [22] **V.L. Likhachev**, Zarubezhnyi opyt resheniia problem energosnabzheniia udalennykh i izolirovannykh raionov [International experience in solving energy supply problems in remote and isolated areas], <https://ur.hse.ru/mirror/pubs/share/414890489.pdf>. Accessed September 25, 2025.
- [23] **A.N. Beliaev, M.E. Verner, E.A. Zakharian, E.V. Sorokin**, Povyshenie zapasov dinamicheskoi ustoychivosti na osnove ispol'zovaniia sistem nakopleniia energii [Increasing dynamic stability reserves through the use of energy storage systems], *Izvestiia NTC Edinoi energeticheskoi sistemy* [News of the Scientific and Technical Center of the Unified Energy System], 1 (90) (2024) 46–55.
- [24] **A.A. Rzyay, V.F. Beley**, The choice of the storage battery on the basis of batteries for the Kaliningrad power, *Vestnik molodezhnoi nauki* [Bulletin of Youth Science], 5 (3) (2020) 12. DOI: 10.46845/2541-8254-2020-2(24)-13-13

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Kirill K. VESELOVKSY – *Kaliningrad State Technical University*.

E-mail: weselkirill@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6699-2458>

Valeriy F. BELEY – *Kaliningrad State Technical University*.

E-mail: vbeley@klgtu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4086-6936>

Поступила: 12.04.2025; Одобрена: 09.11.2025; Принята: 09.11.2025.

Submitted: 12.04.2025; Approved: 09.11.2025; Accepted: 09.11.2025.

Научная статья

УДК 621.315+621.316

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>



И.С. Воронин ✉, *Н.В. Коровкин*, *К.С. Долбин*

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

✉ isvoronin@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНАЯ РАССТАНОВКА АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОСИСТЕМ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Аннотация. Внедрение активно-адаптивных устройств – одно из ключевых направлений модернизации и реконструкции современной электроэнергетики. В настоящей статье предлагается и исследуется новый эффективный алгоритм для расстановки устройств управляемой продольной компенсации (УУПК) в электроэнергетической системе (ЭЭС) из тысяч узлов. Задача расстановки разбивается на две подзадачи: приближенный поиск множества перспективных мест установки (без анализа режимов ЭЭС) и уточнение поиска на найденном множестве (на основе анализа режимов). В рамках предлагаемого алгоритма подзадача приближенного поиска представляется задачей многоцелевой оптимизации и решается с помощью многопоточной реализации генетического алгоритма. Результатом работы алгоритма является множество наборов мест возможной установки УУПК, представляемое в виде фронта Парето. В работе представлены результаты моделирования в Matlab для расстановки УУПК в типовой сети IEEE с 300 узлами. Полученные множества Парето содержат десятки перспективных мест установки УУПК, причем с увеличением числа УУПК растет и число Парето-оптимальных решений. Также кратко рассмотрена использованная в работе реализация алгоритма построения множества Парето-оптимальных решений, выполненная на основе параллельных вычислений.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, активно-адаптивные устройства, многоцелевая оптимизация, параллельные вычисления, генетический алгоритм, оптимизация, статический синхронный продольный компенсатор, оптимальная расстановка активно-адаптивных устройств.

Благодарности: Исследование выполнено за счет субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ (Соглашение №075-15-2025-532).

Для цитирования:

Воронин И.С., Коровкин Н.В., Долбин К.С. Оптимальная расстановка активно-адаптивных устройств для моделей энергосистем большой размерности // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 26–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>*I.S. Voronin* ✉, *N.V. Korovkin*, *K.S. Dolbin*

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

✉ isvoronin@yandex.ru

OPTIMAL ALLOCATION OF FACTS DEVICES FOR LARGE-SCALE POWER SYSTEM MODELS

Abstract. The introduction of active-adaptive devices is one of the key areas in the modernization and reconstruction of the modern electric power industry. This paper proposes and investigates a new effective algorithm for optimal allocation of flexible alternating current transmission systems (FACTS) devices in an electric power system (EPS) of thousands of nodes. The optimal allocation problem is divided into two subtasks: an approximate search for a set of promising installation sites (without analyzing the modes of the power system) and clarifying the found set (based on the analysis of modes). Within the proposed algorithm, the approximate search is a multi-objective optimization problem. A multithreaded implementation of genetic algorithm finds solution for the problem. The result of the algorithm performance is a Pareto front. Each point of the front corresponds to a set of promising installation sites of FACTS. The paper presents the results of the algorithm performance for optimal placement of series FACTS in IEEE 300 bus system. The obtained Pareto sets contain dozens of promising FACTS locations. When number of FACTS increases, the number of points on the Pareto front rises. The paper also considers the implementation of the algorithm for constructing the set of Pareto-optimal solutions based on parallel computing.

Keywords: power system, FACTS, multi-objective optimization, parallel computing, genetic algorithm, optimization, SSSC, optimal allocation of FACTS.

Acknowledgements: The study was carried out using a subsidy from the federal budget to higher education institutions for the implementation of activities aimed at supporting student scientific communities (Agreement No. 075-15-2025-532).

Citation:

Voronin I.S., Korovkin N.V., Dolbin K.S., Optimal allocation of FACTS devices for large-scale power system models, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 26–40, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31402>

Введение

Актуальность

Активно-адаптивные устройства (ААУ), изменяя собственные параметры, способны изменять режимы работы электроэнергетической системы (ЭЭС), и их внедрение – одно из ключевых направлений модернизации и реконструкции современной электроэнергетики. Проблемы, связанные с внедрением ААУ, затрагивают всех участников электроэнергетического рынка, и об их актуальности свидетельствует большое число реализованных проектов по установке ААУ [1–4] и публикаций по этой теме, а ее игнорирование увеличивает резерв мощности, число отказов, аварий, затрат на эксплуатацию ЭЭС. Среди большого разнообразия ААУ [5] выделим устройства управляемой продольной компенсации (УУПК), реализуемые как конденсатор с управляемой емкостью (Thyristor-Controlled Series Capacitor, TCSC) или как статический синхронный продольный компенсатор (Static Synchronous Series Compensator, SSSC) [6], применяемые, как правило, для управления распределением мощности в сети [7] и повышения ее динамической устойчивости [8, 9].

Внедрение ААУ (УУПК) порождает комплекс проблем, включающих определение мест их наилучшего расположения [10–12], рассматриваемое в настоящей статье, а также определения мощностей [13–15] и алгоритмов управления ААУ [16, 17]. Очевидным критерием наилучшей расстановки является улучшение режима ЭЭС [18–20]. Однако сложность процедуры анализа режима, которую нужно провести многократно, существенно ограничивает размеры моделей ЭЭС, для которых выполнялись расчеты. Фактически рассматривались схемы с десятками узлов, в то время как современные модели ЭЭС содержат тысячи узлов.

В настоящей статье предлагается разбить задачу поиска на две подзадачи:

- поиск наилучших мест установки ААУ без анализа режимов, результатом решения которой будет множество перспективных мест установки;
- уточнение поиска на основе анализа режимов, выполняемого только для множества перспективных мест, определенного из решения предыдущей подзадачи.

Такой подход позволяет определить наилучшие места установки ААУ с использованием моделей ЭЭС с высоким уровнем детализации (сотни и тысячи узлов).

Первая подзадача сводится в настоящей статье к задаче многоцелевой оптимизации [21]. Решение выполняется с помощью многопоточной реализации генетического алгоритма (ГА) [22], в рамках которой ГА одновременно обрабатывает несколько популяций, находя наиболее перспективные места установки УУПК. Необходимость многопоточной реализации возникает ввиду большого числа возможных мест установки УУПК в схемах ЭЭС с сотнями и тысячами узлов. Эффективность предложенного подхода подтверждается моделированием в среде Matlab для расстановки УУПК в сети IEEE с 300 узлами.

Критерии наилучшей расстановки УУПК

Рассмотрим первую подзадачу – получение множества перспективных мест установки УУПК.

Влияние УУПК состоит в изменении режимного параметра ветви или узла относительно номинального значения в зависимости от сопротивления УУПК. Большее изменение режимного параметра соответствует более эффективному влиянию УУПК. Это влияние ослабевает с увеличением расстояния по графу от места расположения УУПК до узла или ветви, режимный параметр которых изменяется под его воздействием. Здесь и далее под «расстоянием» будем понимать:

- для пары узлов – число ветвей графа в кратчайшем пути между узлами выбранной пары;
- для пары ветвей – число ветвей графа в кратчайшем пути между серединами ветвей выбранной пары;
- для пары узел-ветвь – число ветвей графа в кратчайшем пути между серединой ветви и узлом выбранной пары.

В настоящей работе принимается, что УУПК, расположенное в некоторой ветви, влияет на все узлы и ветви, расположенные на расстоянии 1 и 2 от него. Это допущение не играет принципиальной роли и может быть ослаблено введением, например, влияния до расстояния 3. Однако, как показывают наши расчеты, расстояние 2 достаточно для получения представительного множества решения первой подзадачи.

Критерии наилучшей расстановки УУПК в ЭЭС формулируются из двух требований. Во-первых, должно быть как можно меньше узлов, на которые одновременно влияют два и более УУПК. В противном случае УУПК должны учитывать действие друг друга, что усложняет их законы управления. Во-вторых, в сети не должно быть узлов, на которые не влияет ни одно УУПК.

Алгоритм вычисления целевых функций

Предложенные критерии расстановки УУПК можно записать в виде целевых функций $F_1(\mathbf{x})$ и $F_2(\mathbf{x})$, где \mathbf{x} – вектор номеров ветвей, в которых размещены УУПК. Наилучшее расположение УУПК будет достигаться на множестве Парето двухцелевой задачи минимизации данных функций. За каждую пару УУПК, одновременно влияющих на узел, значение $F_1(\mathbf{x})$ увеличивается на P_1 (если узел удален на расстояние 1 от обоих УУПК), $P_{12} < P_1$ (если узел удален на расстояние 1 от одного УУПК и на расстояние 2 от другого УУПК) или $P_2 < P_{12}$ (если узел удален от обоих УУПК на расстояние 2). За каждый узел, на который не влияет ни одно УУПК, значение $F_2(\mathbf{x})$ увеличивается на P_0 . Пусть k_1, k_{12}, k_2 и k_0 – число приращений P_1, P_{12}, P_2 и P_0 соответственно, тогда:

$$F_1(\mathbf{x}) = k_1 P_1 + k_{12} P_{12} + k_2 P_2; \quad F_2(\mathbf{x}) = k_0 P_0. \tag{1}$$

Алгоритм вычисления целевых функций поясняется на рис. 1. Пусть ветви с УУПК имеют номера 1, 9 и 13. Узлы на расстоянии 1 (заливка) и расстоянии 2 (штриховка) от УУПК выделены цветом данного УУПК. Если на узел влияют несколько УУПК, узел выделен несколькими цветами. Узлы, на которые не влияет ни одно УУПК, отмечены черным.

У схемы, представленной на рис. 1, есть две особенности. Во-первых, в данной схеме, помимо линий электропередачи (ЛЭП), присутствуют трансформаторы, которые не могут выступать в роли ветвей для установки УУПК. Во-вторых, нумерация узлов непоследовательная: есть узлы с номерами 31, 32, 33 (всего узлов 20), пропущен узел 11. Такая нумерация узлов, поддерживающая удобство восприятия схемы, характерна для описания графов ЭЭС и сохранена нами. Схемные номера всех узлов записываются в вектор N . Вводится понятие программного номера узла, это – номер элемента вектора N , содержащего схемный номер узла. Программные номера очевидным образом упорядочены, и их последовательность не содержит пропусков, именно они используются при работе кода.

Рассмотрим алгоритм вычисления целевых функций для схемы, представленной на рис. 1, и вектора $\mathbf{x} = [1 \ 9 \ 13]^T$ (T – символ транспонирования). Исходные данные (табл. 1) представлены вектором N и матрицей V , содержащей информацию о граничных узлах и типе ветвей (3-й столбец V : 0 – ЛЭП, 1 – трансформатор). Незаполненные ячейки таблиц имеют значение 0.

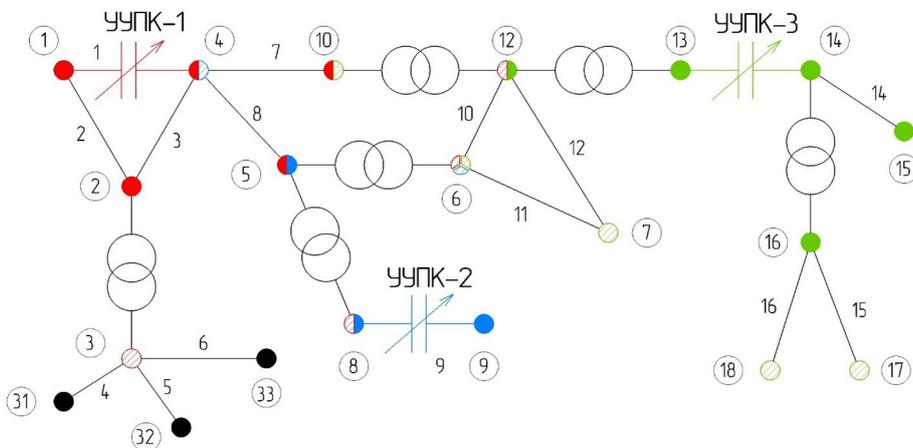


Рис. 1. Вычисление целевых функций
Fig. 1. Calculation of the objective functions

Таблица 1

Исходные данные для вычисления целевых функций

Table 1

Initial data for calculating the objective functions

	N	V			f(Δf)																				V _{new}				
		1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	1	2			
1	1	1	4		♦	♦	♦				♦	♦					♦										1	4	
2	2	1	2		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦					♦										1	2	
3	3	2	4		♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦																2	4	
4	31	2	3	1		♦	♦	♦	♦	♦																	3	31	
5	32	3	31			♦	♦	♦	♦	♦																	3	32	
6	33	3	32			♦	♦	♦	♦	♦																	3	33	
7	4	3	33		♦	♦	♦				♦	♦	♦		♦		♦	♦									4	10	
8	5	4	10		♦	♦					♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦									4	5	
9	6	10	12	1							♦	♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦								8	9	
10	7	4	5									♦	♦	♦			♦	♦	♦								6	12	
11	8	5	8	1								♦	♦	♦		♦	♦										6	7	
12	9	8	9										♦	♦													7	12	
13	10	5	6	1	♦	♦						♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦								13	14	
14	12	6	12									♦	♦	♦	♦		♦	♦	♦	♦							14	15	
15	13	6	7										♦	♦			♦	♦	♦	♦	♦	♦					16	17	
16	14	7	12															♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦		16	18	
17	15	12	13	1															♦	♦	♦	♦							
18	16	13	14																	♦	♦	♦	♦	♦	♦	♦			
19	17	14	15																		♦	♦	♦	♦	♦	♦			
20	18	14	16	1																		♦	♦	♦	♦	♦			
21	X	16	17																										
22	X	16	18																										

Также однократно вычисляется матрица $f_{20 \times 20}$ инцидентности графа ЭЭС, а также матрицы Δf и V_{new} (табл. 1). Матрица Δf вычисляется по формуле:

$$\Delta f = \neg(f \leftrightarrow f^2). \tag{2}$$

Если ненулевые элементы f расположены на пересечении программных номеров узлов, удаленных на расстояние 1 друг от друга, то ненулевые элементы Δf расположены на пересечении программных номеров узлов, удаленных на расстояние 2 друг от друга.

Матрица V_{new} составляется из строк V , соответствующих ЛЭП (трансформаторы не подходят для установки УУПК). Затем третий столбец V_{new} исключается. Нумерация ЛЭП на рис. 1 соответствует порядку строк V_{new} .

Далее формируется нулевая матрица $M_{3 \times 20}$ и поочередно рассматриваются элементы x . Результаты описываемых далее промежуточных вычислений представлены в табл. 2. Первый элемент x равен 1. Схемные номера граничных узлов линии 1 равны элементам первой строки

матрицы V_{new} , т.е. 1 и 4. Программные номера этих узлов равны номерам элементов N со значением 1 и 4, т.е. 1 и 7 соответственно. Далее вычисляется вектор-строка f_{new1} как логическая сумма первой и седьмой строк f . Номера элементов f_{new1} с ненулевыми значениями соответствуют программным номерам узлов на расстоянии 1 от УУПК в линии 1. Далее вычисляется вектор-строка f_{new2} как логическая сумма первой и седьмой строк Δf . Элементам f_{new2} с номерами ненулевых элементов f_{new1} присваивается значение 0, после чего номера элементов f_{new2} с ненулевыми значениями соответствуют программным номерам узлов на расстоянии 2 от УУПК в линии 1. Элементам первой строки M с номерами ненулевых элементов f_{new1} присваивается значение 100, с номерами ненулевых элементов f_{new2} присваивается значение 1. Операция повторяется для оставшихся элементов x и строк M .

Затем суммированием строк M вычисляется вектор-строка S , элементы которой поочередно рассматриваются для определения значений k_1, k_{12}, k_2 и k_0 . Пусть a – значение j -го элемента S ; $\Delta k_1, \Delta k_{12}, \Delta k_2$ и Δk_0 – число приращений P_1, P_{12}, P_2 и P_0 за j -й элемент S . Если $a = 0$, то узел j не охвачен влиянием УУПК, следовательно, $\Delta k_0 = 1, \Delta k_1 = \Delta k_{12} = \Delta k_2 = 0$. Если $a \neq 0$, то число УУПК, от которых узел j удален на расстояние 1, равно N_1 ; на расстояние 2 – равно N_2 , причем:

$$N_1 = \text{entier}(a/100), \quad N_2 = a - 100N_1; \quad (3)$$

$$\Delta k_1 = C_{N_1}^2 = \frac{N_1!}{2!(N_1-2)!} = 0,5N_1(N_1-1); \quad (4)$$

$$\Delta k_{12} = N_1N_2; \quad (5)$$

$$\Delta k_2 = C_{N_2}^2 = \frac{N_2!}{2!(N_2-2)!} = 0,5N_2(N_2-1). \quad (6)$$

При этом, очевидно, $\Delta k_0 = 0$. После рассмотрения всех элементов S :

$$k_1 = \sum \Delta k_1, \quad k_{12} = \sum \Delta k_{12}, \quad k_2 = \sum \Delta k_2, \quad k_0 = \sum \Delta k_0. \quad (7)$$

Результаты промежуточных вычислений при рассмотрении S представлены в табл. 2. Согласно (7), $k_1 = 1, k_{12} = 4, k_2 = 3$ и $k_0 = 3$. Здесь и далее принимается $P_1 = 20, P_{12} = 10, P_2 = 5$ и $P_0 = 20$. Тогда $F_1(x) = 75$ и $F_2(x) = 60$ по (1).

Реализация поиска

Поиск множества оптимальных x осуществляется с помощью ГА. Несмотря на то, что анализ режимов работы ЭЭС не выполняется, время построения этого множества достаточно велико, что является следствием большого числа вариантов расстановки УУПК. Так, оценка числа возможных вариантов расстановки 20 УУПК в схеме с 300 ветвями дает $\sim 10^{30}$, поэтому для эффективного построения множества оптимальных x желательно использование параллельных вычислений. В настоящей работе в рамках ГА одновременно на разных ядрах однопроцессорного компьютера запускается обработка нескольких (по числу ядер) популяций, независимо развивающихся в течение нескольких десятков поколений. По завершении этого внутреннего расчетного этапа независимые популяции обмениваются Парето-оптимальными решениями, создают на их основе новые независимые популяции, и процесс повторяется (внешний расчетный этап). Как показал опыт наших расчетов, число повторений на внешнем расчетном этапе

Таблица 2

Результаты промежуточных вычислений

Table 2

Results of intermediate calculations

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
f_{new1}	♦	♦					♦	♦					♦								
f_{new2}			♦						♦		♦			♦							
M	100	100	1				100	100	1		1		100	1							
							1	100	1		100	100									
									1	1			1	100	100	100	100	100	100	1	1
S	100	100	1				101	200	3	1	101	100	101	101	100	100	100	100	100	1	1
Δk_0				1	1	1															
N_1	1	1					1	2			1	1	1	1	1	1	1	1			
N_2			1				1		3	1	1		1	1					1	1	
Δk_1								1													
Δk_{12}							1				1		1	1							
Δk_2									3												

невелико и составляет 6–8. По завершении повторений внешнего расчетного этапа популяции объединяют свои множества Парето в один фронт Парето, который и является результатом решения первой подзадачи.

Реализация внешнего расчетного этапа поясняется на рис. 2 для схемы, представленной на рис. 1. Число УУПК $N_{УПК} = 3$, размер популяции $N_{поп} = 5$, число популяций, одновременно обрабатываемых в рамках ГА, $N_{ГА} = 3$. Все операции внешнего расчетного этапа, кроме обмена Парето-оптимальными решениями между популяциями, выполняются в блоке параллельных вычислений. Порядок выполнения операций следующий:

1. Формируется нулевая матрица $Y_{3 \times 15}$ размерностью $N_{ГА} \times (N_{поп} \cdot N_{УПК})$.
2. Парето-оптимальные решения i -й популяции представляются в виде матрицы размерностью $N_{пар} \cdot N_{УПК}$, где $N_{пар}$ – число точек на фронте Парето (каждая строка соответствует одной точке на фронте Парето), и строки данной матрицы последовательно записываются в i -ю строку Y .
3. В рамках операции обмена Парето-оптимальными решениями между популяциями создается матрица $G_{3 \times 30}$ размерностью $N_{ГА} \times 2(N_{поп} \cdot N_{УПК})$. Первая строка G получается объединением первой и последней строки Y , i -я строка ($i > 1$) получается объединением i -й и $(i - 1)$ -й строки Y .
4. Новая i -я популяция ГА формируется из i -й строки G путем последовательного выделения ненулевых строк по $N_{УПК} = 3$ элемента.

Число точек на фронте Парето i -й популяции может превысить заданный размер популяции $N_{поп}$. Тогда результат не может быть записан в Y размерностью $N_{ГА} \times (N_{поп} \cdot N_{УПК})$, и алгоритм прекратит работу. Выходом из сложившейся ситуации является реализация процедуры, увеличивающей $N_{поп}$ и размерность Y при необходимости. Например, можно создать вектор P с $N_{ГА}$ -элементами и по завершении обработки i -й популяции записывать число точек на фронте Парето в i -й элемент P . При выполнении операции формирования новых начальных популяций, если $P(i) + P(i - 1) > N_{поп}$, увеличивать размер популяции i -го алгоритма до $P_{\Sigma} = P(i) + P(i - 1)$ и изменять размерность Y на $N_{ГА} \times (P_{\Sigma} \cdot N_{УПК})$, размерность G на $N_{ГА} \times 2(P_{\Sigma} \cdot N_{УПК})$.

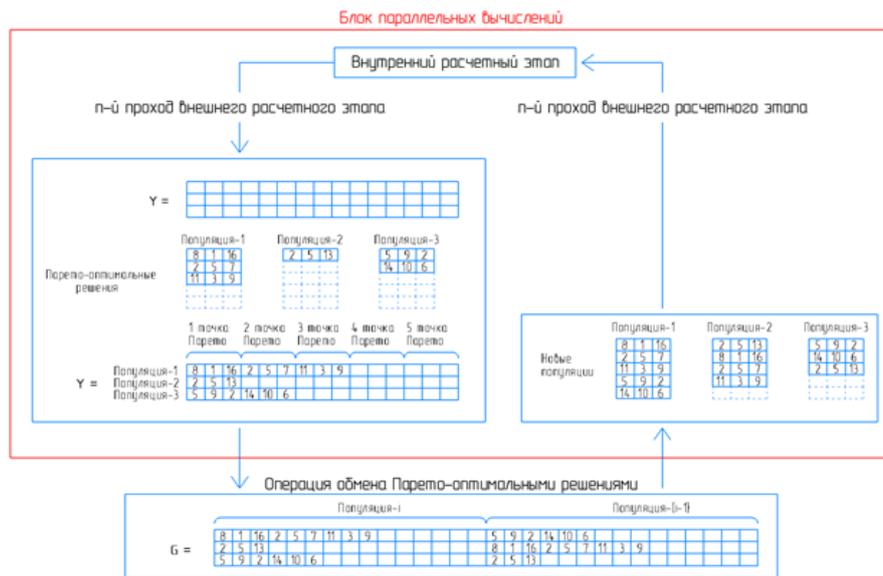


Рис. 2. К описанию реализации поиска

Fig. 2. On the description of the search implementation

Результаты и обсуждение

Эффективность предложенного алгоритма [22] демонстрируется на задаче приближенного поиска оптимальных мест установки УУПК в тестовой схеме IEEE с 300 узлами [23]. Влияние скорости приращения $F_1(x)$ на решение задачи исследовалось авторами в [24], в настоящей статье задача была решена три раза для разного числа устанавливаемых УУПК. Параметры ГА были заданы следующими: размер популяции – 222, число поколений – 100, число внешних расчетных этапов – 8, число популяций, одновременно обрабатываемых в рамках ГА, – 96. Результаты решения представлены на рис. 3 в виде фронтов Парето.

В каждом фронте Парето можно выделить следующие точки:

- 1) точка, соответствующая минимуму $F_1(x)$;
- 2) точка, соответствующая минимуму $F_2(x)$;
- 3) серединная точка множества Парето;
- 4) типичный представитель кластера Парето-оптимальных решений.

Данные точки приведены в табл. 3 и выделены цветом: красным – для первой точки, синим – для второй, зеленым – для третьей и черным – для четвертой. Нумерация ЛЭП соответствует порядку строк в таблице исходных данных по ветвям [23]. В реальности каждой точке (F_1 , F_2) на фронте Парето соответствуют десятки неодинаковых x , в таблицах записаны типичные представители множеств этих x .

Каждой выделенной точке множества Парето соответствует набор ЛЭП. Данные ЛЭП отмечены кружками на схеме IEEE с 300 узлами на рис. 4. Цвет кружка на рис. 4 соответствует цвету точки в табл. 3.

Для точной идентификации ЛЭП, выделенных на рис. 4, приводятся номера их граничных узлов в схеме IEEE с 300 узлами (табл. 4) согласно [23].

При увеличении числа устанавливаемых УУПК от 6 до 8 фронт Парето смещается в сторону меньших значений $F_2(x)$, число Парето-оптимальных решений увеличивается. Первое объясняется тем, что увеличение числа УУПК позволяет управлять параметрами режима в большем числе узлов. Второе – увеличением числа вариантов расстановки (в том числе оптимальных по Парето) УУПК при увеличении числа последних.

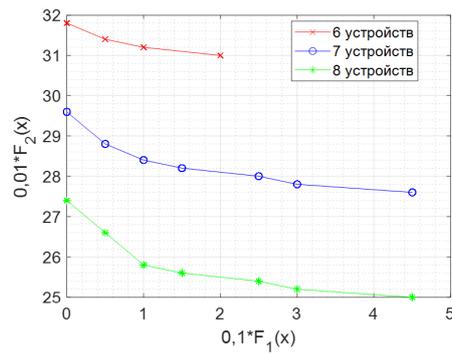


Рис. 3. Фронты Парето для задачи оптимальной расстановки УУПК в сети IEEE с 300 узлами
 Fig. 3. Pareto fronts for the optimal allocation of series FACTS in IEEE 300 bus system

Таблица 3

Выделенные точки множеств Парето при разном числе УУПК

Table 3

Selected points of Pareto sets at different numbers of series FACTS

	x							$F_1(x)$	$F_2(x)$	
Фронт Парето при 6 УУПК	60	82	128	332	317	214	X	0	3180	
	82	27	128	214	317	60		20	3100	
	60	82	220	188	317	128		5	3140	
	60	82	220	188	317	128		5	3140	
Фронт Парето при 7 УУПК	53	164	214	128	332	82	317	0	2960	
	128	189	27	60	317	220	82	45	2760	
	128	190	28	60	317	220	82	15	2820	
	128	188	28	82	317	60	220	10	2840	
Фронт Парето при 8 УУПК	82	214	53	332	317	164	128	174	0	2740
	332	27	82	128	189	220	317	60	45	2500
	220	60	82	28	332	190	317	128	15	2560
	220	60	82	332	128	188	317	181	5	2660

Дискуссия

Несмотря на эффективность предложенного алгоритма приближенного поиска, по прошествии 6–8 циклов расчета генетическое разнообразие полностью исчерпывается, Парето-оптимальные решения параллельных потоков ГА полностью совпадают. Если в какой-то популяции появляются лучшие по Парето решения, то на последующих циклах расчета данные решения входят в другие популяции и оказываются более перспективными родителями. Таким образом уничтожаются генетические отличия популяций, параллельно обрабатываемых ГА. Вопрос улучшения алгоритма обмена лучшими особями между популяциями требует дальнейшего изучения.

Выводы

1. Предложен алгоритм, позволяющий решить задачу оптимальной расстановки заданного числа УУПК для реальных схем ЭЭС с сотнями и даже тысячами узлов.

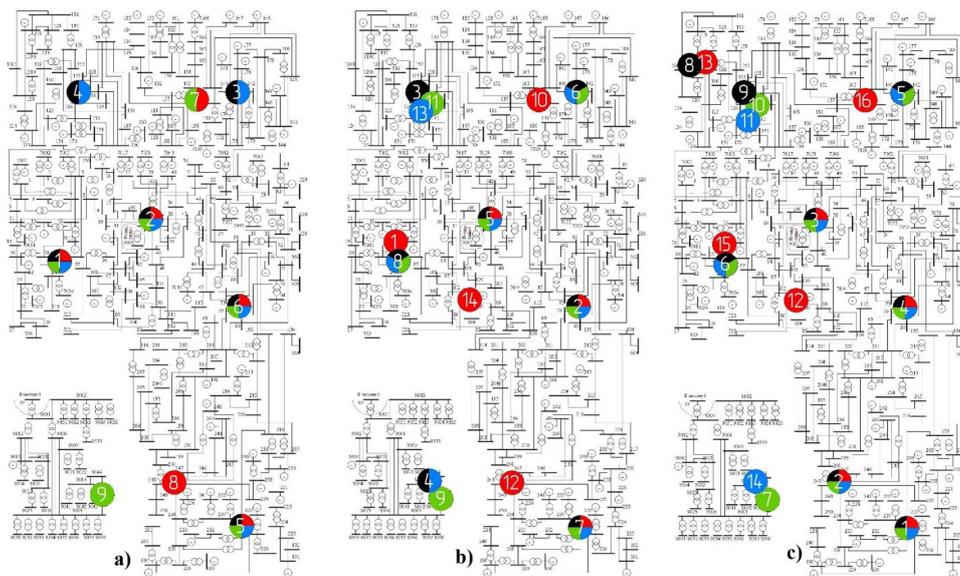


Рис. 4. Оптимальное размещение УУПК в сети IEEE с 300 узлами: а) 6 УУПК, б) 7 УУПК, в) 8 УУПК

Fig. 4. Optimal allocation of series FACTS in IEEE 300 bus system: a) 6 FACTS, b) 7 FACTS, c) 8 FACTS

Таблица 4

Номера граничных узлов выделенных ЛЭП на рис. 4

Table 4

Numbers of the boundary nodes of the selected power lines in fig. 4

№ по рис. 4	а	б	в
1	19–21 (60)	12–21 (53)	231–237 (317)
2	37–41 (82)	73–79 (128)	247–248 (332)
3	140–142 (220)	126–127 (188)	37–41 (82)
4	126–127 (188)	9004–9044 (28)	73–79 (128)
5	231–237 (317)	37–41 (82)	140–142 (220)
6	73–79 (128)	140–142 (220)	19–21 (60)
7	137–140 (214)	231–237 (317)	9003–9044 (27)
8	247–248 (332)	19–21 (60)	119–120 (181)
9	9003–9044 (27)	9003–9044 (27)	126–127 (188)
10	—	137–140 (214)	126–129 (189)
11	—	126–129 (189)	126–132 (190)
12	—	247–248 (332)	104–108 (164)
13	—	126–132 (190)	115–122 (174)
14	—	104–108 (164)	9004–9044 (28)
15	—	—	12–21 (53)
16	—	—	137–140 (214)

2. В рамках алгоритма формулируется подзадача приближенного поиска мест перспективной установки УУПК, которая не требует анализа режимов ЭЭС. Целевыми функциями служат одновременное влияние нескольких УУПК и отсутствие влияния УУПК на узлы графа ЭЭС.

3. В алгоритме используется многопоточная реализация ГА, которая, по нашим представлениям, ускоряет построение множества Парето на порядок по сравнению с обычным ГА.

4. Получены результаты работы алгоритма (места перспективной установки УУПК) для типовой сети IEEE с 300 узлами при различном числе устанавливаемых УУПК. Из полученных результатов по итогам расчета режима ЭЭС можно выделить наилучшие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Sharma S., Gupta S., Zuhaib M., Bhuria V., Malik H., Almutairi A., Afthanorhan A., Asef Hossaini M. A comprehensive review on STATCOM: paradigm of modeling, control, stability, optimal location, integration, application, and installation, *IEEE Access*, 12 (2024) 2701–2729. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3345216

[2] Hagh M.T., Borhany M.A.J., Taghizad-Tavana K., Oskouei M.Z. A comprehensive review of flexible alternating current transmission system (FACTS): topologies, applications, optimal placement, and innovative models, *Heliyon*, 11 (1) (2025) e41001. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41001

[3] Paramalingam J., Nakamura F., Matsuda A., Yamanaka D., Tsuchiya T. Application of FACTS devices for a dynamic power system within the USA, 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 – ECCE Asia), (2018) 2329–2334. DOI: 10.23919/IPEC.2018.8507559

[4] Meikandasivam S., Nema R.K., Jain S.K. Performance of installed TCSC projects, India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010), (2011) 1–8. DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728103

[5] Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Васильев С.Н. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2012.

[6] Ordóñez C.A., Gómez-Expósito A., Maza-Ortega J.M. Series compensation of transmission systems: a literature survey, *Energies*, 14 (6) (2021) 1717. DOI: 10.3390/en14061717

[7] Cao F., Hu L., Zhang J., Almenweer R.A., Alnasseir J., Almaghout F. Study on power flow improvement using static compensators and thyristor controlled series capacitor in transmission network, 2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEEET), (2023) 354–359. DOI: 10.1109/CEEET59667.2023.10420634

[8] Smolovik S.V., Chudny V.S., Liamov A.S., Ryndina I.E., Denisenko A.I. Application of a static synchronous series compensator to increase the transient stability of a powerful HPP, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (2021) 1562–1565. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396305

[9] Šešok A., Pavić I. Transient stability improvement of Croatian power system using FACTS, 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia), (2022) 51–55. DOI: 10.1109/ISGTA-sia54193.2022.10003484

[10] Kamarposhti M.A., Shokouhandeh H., Colak I., Band S.S., Eguchi K. Optimal location of FACTS devices in order to simultaneously improving transmission losses and stability margin using artificial bee colony algorithm, *IEEE Access*, 9 (2021) 125920–125929. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108687

[11] Khan N.H., Wang Y., Tian D., Jamal R., Iqbal S., Saif M.A.A., Ebeed M.A. Novel modified lightning attachment procedure optimization technique for optimal allocation of the FACTS devices in power systems, *IEEE Access*, 9 (2021) 47976–47997. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3059201

[12] Kar M.K., Kanungo S., Alsaif F., Ustun T.S. Optimal placement of FACTS devices using modified whale optimization algorithm for minimization of transmission losses, *IEEE Access*, 12 (2024) 130816–130831. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3458039

[13] Ismail B., Abdul Wahab N.I., Othman M.L., Radzi M.A.M., Naidu Vijayakumar K., Mat Naain M.N. A comprehensive review on optimal location and sizing of reactive power compensation using hybrid-based approaches for power loss reduction, voltage stability improvement, voltage profile enhancement and loadability enhancement, *IEEE Access*, 8 (2020) 222733–222765. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043297

- [14] Shehata A.A., Refaat A., Ahmed M.K., Korovkin N.V. Optimal placement and sizing of FACTS devices based on autonomous groups particle swarm optimization technique, Archives of Electrical Engineering, 70 (1) (2021) 161–172. DOI: 10.24425/aee.2021.136059
- [15] Zadehbagheri M., Ildarabadi R., Javadian A.M. Optimal power flow in the presence of HVDC lines along with optimal placement of FACTS in order to power system stability improvement in different conditions: technical and economic approach, IEEE Access, 11 (2023) 57745–57771. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3283573
- [16] Kumar T.S., Sathiyasekar K. Enhancing system stability with FACTS devices using least mean square based neural network algorithm, 2023 4th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), (2023) 1462–1466. DOI: 10.1109/ICOSEC58147.2023.10276121
- [17] Pandya M. Rotor angle stability analysis with coordinated control of FACTS devices using particle swarm optimization, 2024 IEEE 12th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), (2024) 42–46. DOI: 10.1109/SEGE62220.2024.10739519
- [18] Khan N.H., Wang Y., Tian D., Jamal R., Kamel S., Ebeed M. Optimal siting and sizing of SSSC using modified salp swarm algorithm considering optimal reactive power dispatch problem, IEEE Access, 9 (2021) 49249–49266. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061503
- [19] Siregar Y., Agustina P.N., Pane Z. Optimization placement of SVC and TCSC in power transmission network 150 kV SUMBAGUT using artificial bee colony algorithm, 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), (2021) 635–639. DOI: 10.1109/ISRITI54043.2021.9702832
- [20] Saini M., Djalal M.R., Shiddiq Yunus A.M. FACTS: SVC optimization for optimal power flow using craziness particle swarm optimization in Sulsehrabar system, 2024 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia, (2024) 346–351. DOI: 10.1109/ICPSAsia61913.2024.10761326
- [21] Ahmad A.A., Sirjani R. Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review, Ain Shams Engineering Journal, 11 (3) (2020) 611–628. DOI: 10.1016/j.asej.2019.10.013
- [22] Воронин И.С., Коровкин Н.В., Модулина А.Н., Чернышева В.В. Программа с использованием многоядерной обработки данных для оптимальной расстановки активно-адаптивных устройств в ЭЭС на основе двух критериев качества. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2025685976 Российская Федерация; заявитель и правообладатель Воронин И.С. № 2025684731; заявл. 17.09.2025; опублик. 26.09.2025, Бюл. № 10. 1 с.
- [23] Отдел энергетики Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра УрО Российской АН. Тестовые схемы. Режим доступа: http://energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3 (дата обращения: 11.10.2025).
- [24] Voronin I.S., Korovkin N.V. Optimization of placement of FACTS in electric power system based on soft computing, 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), (2025) 142–146. DOI: 10.1109/UralCon67204.2025.11206624

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВОРОНИН Илья Сергеевич – студент магистратуры, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: isvoronin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7655-2921>

КОРОВКИН Николай Владимирович – заведующий 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>

ДОЛБИН Кирилл Сергеевич — инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: kirill.dolbin.02@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6112-1297>

REFERENCES

- [1] **S. Sharma, S. Gupta, M. Zuhaib, V. Bhuria, H. Malik, A. Almutairi, A. Afthanorhan, M. Asef Hossaini**, A comprehensive review on STATCOM: paradigm of modeling, control, stability, optimal location, integration, application, and installation, *IEEE Access*, 12 (2024) 2701–2729. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3345216
- [2] **M.T. Hagh, M.A.J. Borhany, K. Taghizad-Tavana, M.Z. Oskouei**, A comprehensive review of flexible alternating current transmission system (FACTS): topologies, applications, optimal placement, and innovative models, *Helion*, 11 (2025) e40948, DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e41001
- [3] **D. Sullivan, B. Buterbaugh, J. Paramalingam, F. Nakamura, A. Matsuda, D. Yamanaka, T. Tsuchiya**, Application of FACTS devices for a dynamic power system within the USA, 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), (2018) 2329–2334. DOI: 10.23919/IP-EC.2018.8507559
- [4] **S. Meikandasivam, R.K. Nema, S.K. Jain**, Performance of installed TCSC projects, India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010), (2011) 1–8. DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728103
- [5] **R.N. Berdnikov, V.V. Bushuev, S.N. Vasil'ev et al.**, Kontseptsiiia intellektual'noi elektroenergeticheskoi sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoi set'iu [The concept of an intelligent electric power system of Russia with an active-adaptive network], Moscow: OAO “FSK EES”, 2012.
- [6] **C. Ordóñez, A. Gómez-Expósito, J.M. Maza-Ortega**, Series compensation of transmission systems: a literature survey, *Energies*, 14 (2021) 1717. DOI: 10.3390/en14061717
- [7] **F. Cao, L. Hu, J. Zhang, R.A. Almenweer, J. Alnasseir, F. Almaghout**, Study on power flow improvement using static compensators and thyristor controlled series capacitor in transmission network, 2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT), (2023) 354–359. DOI: 10.1109/CEECT59667.2023.10420634
- [8] **S.V. Smolovik, V.S. Chudny, A.S. Liamov, I.E. Ryndina, A.I. Denisenko**, Application of a static synchronous series compensator to increase the transient stability of a powerful HPP, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2021) 1562–1565. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396305
- [9] **A. Šešok, I. Pavić**, Transient stability improvement of Croatian power system using FACTS, 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), (2022) 51–55. DOI: 10.1109/ISGTAsia54193.2022.10003484
- [10] **M.A. Kamarposhti, H. Shokouhandeh, I. Colak, S.S. Band, K. Eguchi**, Optimal location of FACTS devices in order to simultaneously improving transmission losses and stability margin using artificial bee colony algorithm, *IEEE Access*, 9 (2021) 125920–125929. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108687
- [11] **N.H. Khan, Y. Wang, D. Tian, R. Jamal, S. Iqbal, M.A.A. Saif, M.A. Ebeed**, Novel modified lightning attachment procedure optimization technique for optimal allocation of the FACTS devices in power systems, *IEEE Access*, 9 (2021) 47976–47997. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3059201
- [12] **M.K. Kar, S. Kanungo, F. Alsaif, T.S. Ustun**, Optimal placement of FACTS devices using modified whale optimization algorithm for minimization of transmission losses, *IEEE Access*, 12 (2024) 130816–130831. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3458039
- [13] **B. Ismail, N.I. Abdul Wahab, M.L. Othman, M.A.M. Radzi, K. Naidu Vijayakumar, M.N. Mat Naain**, A comprehensive review on optimal location and sizing of reactive power compensation using hybrid-based

approaches for power loss reduction, voltage stability improvement, voltage profile enhancement and loadability enhancement, *IEEE Access*, 8 (2020) 222733–222765. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043297

[14] **A.A. Shehata, A. Refaat, M.K. Ahmed, N.V. Korovkin**, Optimal placement and sizing of FACTS devices based on autonomous groups particle swarm optimization technique, *Archives of Electrical Engineering*, 70 (2021) 161–172. DOI: 10.24425/ae.2021.136059

[15] **M. Zadehbagheri, R. Ildarabadi, A.M. Javadian**, Optimal power flow in the presence of HVDC lines along with optimal placement of FACTS in order to power system stability improvement in different conditions: technical and economic approach, *IEEE Access*, 11 (2023) 57745–57771. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3283573

[16] **T.S. Kumar, K. Sathiyasekar**, Enhancing system stability with FACTS devices using least mean square based neural network algorithm, 2023 4th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC), (2023) 1462–1466. DOI: 10.1109/ICOSEC58147.2023.10276121

[17] **M. Pandya**, Rotor angle stability analysis with coordinated control of FACTS devices using particle swarm optimization, 2024 IEEE 12th International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), (2024) 42–46. DOI: 10.1109/SEGE62220.2024.10739519

[18] **N.H. Khan, Y. Wang, D. Tian, R. Jamal, S. Kamel, M. Ebeed**, Optimal siting and sizing of SSSC using modified salp swarm algorithm considering optimal reactive power dispatch problem, *IEEE Access*, 9 (2021) 49249–49266. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061503

[19] **Y. Siregar, P.N. Agustina, Z. Pane**, Optimization placement of SVC and TCSC in power transmission network 150 kV Sumbagut using artificial bee colony algorithm, 2021 4th International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI), (2021) 635–639. DOI: 10.1109/ISRITI54043.2021.9702832

[20] **M. Saini, M.R. Djalal, A.M.S. Yunus**, FACTS: SVC optimization for optimal power flow using craziness particle swarm optimization in Sulselrabar system, 2024 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia, (2024) 346–351. DOI: 10.1109/ICPSAsia61913.2024.10761326

[21] **A.A. Ahmad, R. Sirjani**, Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: An updated review, *Ain Shams Engineering Journal*, 11 (3) (2020) 611–628. DOI: 10.1016/j.asej.2019.10.013

[22] **I.S. Voronin, N.V. Korovkin, A.N. Modulina, V.V. Chernysheva**, Programma s ispolzovaniyem mnogoyadernoy obrabotki dannykh dlya optimalnoy rasstanovki aktivno-adaptivnykh ustroystv v EES na osnove dvukh kriteriyev kachestva [A program using multicore data processing for optimal placement of FACTS devices in a power grid based on two quality criteria], Russian Federation Certificate of state registration of a computer program, No. 2025685976 (2025).

[23] Department of energy of the Institute of socio-economic and energy problems of the north of the Komi scientific center of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Test schemes, energy.komisc.ru/dev/test_cases#Link_3. Accessed October 11, 2025

[24] **I.S. Voronin, N.V. Korovkin**, Optimization of placement of FACTS in electric power system based on soft computing, 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), (2025) 142–146. DOI: 10.1109/UralCon67204.2025.11206624

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Iliia S. VORONIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: isvoronin@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7655-2921>

Nikolay V. KOROVKIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1173-8727>

Kirill S. DOLBIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: kirill.dolbin.02@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6112-1297>

Поступила: 13.10.2025; Одобрена: 08.12.2025; Принята: 16.12.2025.

Submitted: 13.10.2025; Approved: 08.12.2025; Accepted: 16.12.2025.

Научная статья

УДК 621.3.048

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31403>



*В.О. Белько¹, Э.Р. Маннанов² ✉, А.М. Костельов²,
Н.А. Федотов¹, Е.Г. Феклистов¹, Т.М. Шикова¹*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, Россия

✉ emil-mannanov@mail.ru

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛЮДОСОДЕРЖАЩЕЙ ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация. Представлены результаты комплексного исследования физико-механических характеристик корпусной слюдосодержащей изоляции обмоток статора высоковольтных турбогенераторов. Сравнительный анализ проведен для изоляции, изготовленной по технологиям пропитанных лент (Resin-Rich, RR) и вакуум-нагнетательной пропитки (Vacuum Pressure Impregnation, VPI). Определены прочностные и деформационные характеристики при различных видах механического нагружения, оценена межслойная адгезионная прочность и температурное расширение с учетом анизотропии материала. Установлены существенные различия в поведении исследуемых типов изоляции при повышенных температурах. Выявлена значительная анизотропия теплофизических свойств материала. Методом ускоренного теплового старения показана сохранность механических характеристик в течение продолжительного срока службы. Полученные результаты имеют практическую значимость для расчетов термомеханической и вибрационной стойкости систем изоляции высоковольтных турбогенераторов.

Ключевые слова: обмотка статора, слюдосодержащая корпусная изоляция, технология пропитанных лент, вакуум-нагнетательная пропитка, механические характеристики, температурный коэффициент линейного расширения, тепловое старение.

Для цитирования:

Белько В.О., Маннанов Э.Р., Костельов А.М., и др. Физико-механические характеристики слюдосодержащей изоляции обмоток статора высоковольтных электрических машин // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 41–57. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31403>



V.O. Belko¹, E.R. Mannanov² ✉, A.M. Kostelov²,
N.A. Fedotov¹, E.G. Feklistov¹, T.M. Shikova¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² JSC "Power machines", St. Petersburg, St. Petersburg, Russia

✉ emil-mannanov@mail.ru

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MICA-BASED INSULATION FOR HIGH-VOLTAGE STATOR WINDINGS

Abstract. The results of a comprehensive study of the physical and mechanical characteristics of the mica-containing groundwall insulation of stator windings for high-voltage turbogenerators are presented. A comparative analysis was carried out for insulation manufactured using resin-rich (RR) and vacuum pressure impregnation (VPI) technologies. Strength and deformation characteristics under various types of mechanical loading were determined, interlayer adhesive strength was assessed and thermal expansion was evaluated, taking into account the material's anisotropy. Significant differences in the behavior of the studied insulation types at elevated temperatures have been established. A significant anisotropy of the thermophysical properties of the material has been revealed. Accelerated thermal aging tests demonstrated the retention of mechanical characteristics over a long service life. The obtained results are of practical importance for calculating the thermomechanical and vibrational stability of the insulation systems of high-voltage turbogenerators.

Keywords: stator winding, mica-containing groundwall insulation, resin-rich technology, vacuum pressure impregnation, mechanical characteristics, temperature coefficient of linear expansion, thermal ageing.

Citation:

Belko V.O., Mannanov E.R., Kostelov A.M. et al., Physical and mechanical properties of mica-based insulation for high-voltage stator windings, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 41–57, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31403>

Введение

Надежность и долговечность высоковольтных турбогенераторов (ТГ) являются критически важными факторами для устойчивой работы энергетических систем. Одним из ключевых элементов, определяющих ресурс электрических машин, является изоляция обмотки статора, выход из строя которой остается доминирующей причиной отказов генераторного оборудования [1]. Хотя традиционно основным фактором старения изоляции принято считать электрические воздействия, сопровождающиеся частичными разрядами, современные исследования убедительно демонстрируют значительную роль механических нагрузок в процессе деградации изоляционных систем [2–6].

В процессе эксплуатации на изоляцию воздействует комплекс взаимосвязанных факторов: вибрационные нагрузки, электродинамические усилия при коротких замыканиях, циклические термические напряжения. Эти воздействия могут приводить к прогрессирующим повреждениям, таким как расслоение изоляции, образование микротрещин, ослабление крепления стержней в пазовой и лобовой частях. Указанные дефекты, в свою очередь, создают предпосылки для развития разрядных явлений, что в конечном итоге существенно снижает длительную электрическую прочность изоляционной системы [2, 6–8].

Актуальной задачей современного машиностроения является создание адекватных расчетных моделей обмотки статора, позволяющих прогнозировать ее поведение в реальных условиях эксплуатации [9–12]. Решение этой задачи требует точных данных о комплексе физико-механических характеристик элементов системы изоляции как в исходном состоянии, так и в процессе старения. Однако имеющиеся литературные данные по механическим характеристикам современных отечественных материалов высоковольтной изоляции ограничены и в значительной степени относятся к предыдущим периодам развития изоляционных технологий [13].

В связи с широким распространением двух основных технологий изготовления изоляции – пропитанных лент (Resin-Rich, RR) и вакуум-нагнетательной пропитки (Vacuum Pressure Impregnation, VPI) – представляет значительный научный и практический интерес сравнительный анализ их физико-механических свойств. Целью данной работы является экспериментальное определение и комплексный анализ физико-механических характеристик современных вариантов слюдосодержащей корпусной изоляции, изготовленных по технологиям RR и VPI.

Образцы и методы исследования

Подготовка образцов

Корпусная изоляция обмотки статора ТГ представляет собой композиционную систему на основе слюдосодержащих лент, наносимых послойной намоткой. Данная структура обеспечивает стойкость к комплексному воздействию электрических, тепловых и механических нагрузок в процессе эксплуатации. Исследования проводились на образцах, максимально приближенных по составу и технологии изготовления к реальной изоляции стержней обмотки статора ТГ. Были изготовлены два типа изоляции:

- технология RR: использовалась предварительно пропитанная лента состава: слюдобумага – 45%, стеклоткань – 20%, эпоксिनволачное связующее с отвердителем – 35%. Термопресование проводилось гидростатическим способом в условиях, имитирующих промышленное производство.
- технология VPI: применялась «сухая» лента (слюдобумага – 82%, стеклоткань – 12%, связующее – 4÷12%) с последующей пропиткой эпоксидным диановым компаундом с ангидридным отвердителем в условиях вакуума и повышенного давления.

Принципиальная схема изготовления изоляции этих вариантов приведена на рис. 1. Несмотря на разные технологические схемы изготовления, окончательная структура изоляции в обоих случаях должна быть одинаковой.

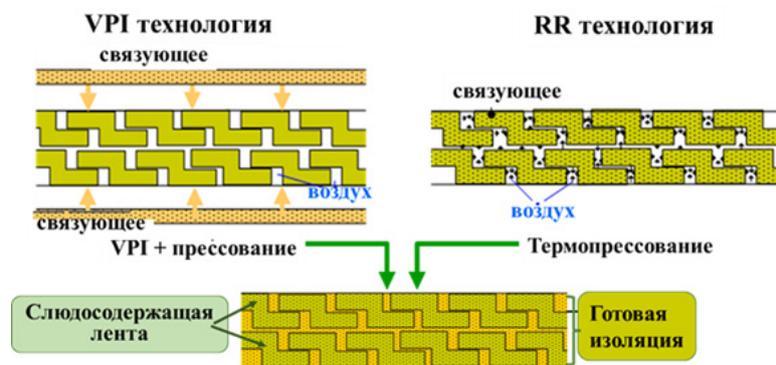


Рис. 1. Принципиальная схема изготовления изоляции по двум технологическим вариантам

Fig. 1. Schematic diagram of insulation manufacturing according to two technological options

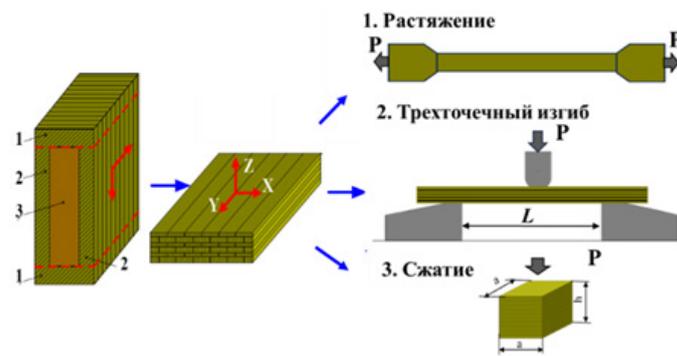


Рис. 2. Принципиальная схема изготовления и испытания образцов изоляции: 1 – часть изоляции для изготовления образцов на сжатие, 2 – часть изоляции для изготовления образцов на растяжение и изгиб, 3 – оправка из стеклотекстолита

Fig. 2. Schematic diagram of the manufacture and testing of insulation samples: 1 – insulation part for manufacturing compression test specimens, 2 – insulation part for manufacturing tensile and bending test specimens, 3 – mandrel made of glass-reinforced epoxy laminate

С учетом анизотропии материала образцы вырезались в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 2):

- направление X – поперек направления наложения ленты;
- направление Y – вдоль направления наложения ленты;
- направление Z – перпендикулярно плоскости слоев.

Методы исследования

Определение предела механической прочности (σ) и модуля упругости (E) изоляции при воздействии растягивающих, сжимающих и изгибающих нагрузок

Образцы для испытаний изготавливались путем механической вырезки из макетов, имитирующих изоляцию стержней обмотки статора ТГ. Макеты изготавливались по стандартным технологическим процессам, которые применяются для корпусной изоляции обмотки статора ТГ. При изготовлении макетов определенное количество слоев слюдосодержащей ленты наносилось механизированным способом с перекрытием $\frac{1}{2}$ ширины ленты на оправку (имитирует токоведущую часть обмотки), покрытую антиадгезионной фторопластовой пленкой (рис. 2). После прессования (или пропитки) и отверждения пластины изоляции снимались с оправки и из них вырезались образцы для испытаний.

Испытания проводились на универсальной разрывной машине Instron 1122 при скоростях нагружения 10 мм/мин. Использовались образцы прямоугольного сечения площадью $13,0 \times (3,0-3,5)$ мм² для растяжения и 10×10 мм² для сжатия. Предел прочности (σ) определялся по максимальной нагрузке в момент разрушения, модуль упругости (E) рассчитывался по тангенсу угла наклона деформационной кривой. Форма и размеры образцов максимально приближены к описанию [13].

Испытания на изгиб проводились по трехточечной схеме нагружения при следующих условиях: расстояние между опорами $L = 65$ мм, ширина образца $b = 12$ мм, толщина $h = 3,0-3,5$ мм. Нагружение производилось перпендикулярно слоям ленты. В этом случае изгибающее напряжение σ_u рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_u = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}. \quad (1)$$

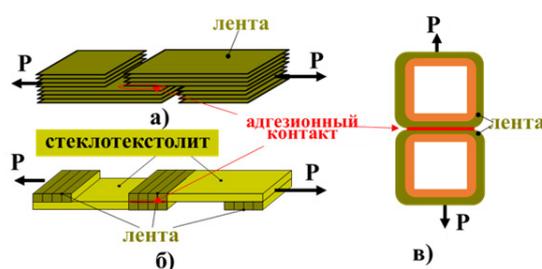


Рис. 3. Конструкция образцов для определения адгезионной прочности
 Fig. 3. Design of samples for determination of adhesive strength

Количество образцов при каждом испытании составляло не менее пяти. Статистическая обработка результатов проведена на основе нормального закона распределения.

Определение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР)

Измерения проводились на dilatометре DIL 802L в температурном диапазоне от комнатной температуры до 120°C при скорости нагрева 1°C/мин. Измерения выполнялись для всех трех направлений анизотропии (X, Y, Z).

Определение адгезионной прочности

Для оценки межслойного взаимодействия использовались специально разработанные методики:

- определение прочности на межслойный сдвиг в направлениях X и Y (рис. 3а, б),
- определение прочности на отрыв в направлении Z (рис. 3в).

Измерения проводились на образцах, изготовленных с соблюдением промышленной технологии нанесения ленты и термопрессования.

Оценка термостойкости изоляции

Сравнение термостойкости исследуемых видов изоляции проведено на основе метода термогравиметрического анализа (TGA). Анализ выполнялся на приборе NETZSCH TG 209 F1 в окислительной среде (воздух) в диапазоне температур 30–500°C при скорости нагрева 10°C/мин. Термостойкость оценивалась по температуре 5%-ной потери массы (τ_5).

Проведение теплового старения

Ускоренное тепловое старение проводилось при трех температурных уровнях (180, 200 и 220°C) в соответствии с требованиями ГОСТ 10518-88. Использовался циклический метод старения с продолжительностью циклов 17, 6 и 2 суток соответственно. После каждого цикла старения контролировались механические характеристики при растяжении, сжатии и изгибе.

Результаты и обсуждение

Физико-механические характеристики изоляции в исходном состоянии

Определение характеристик изоляции при воздействии растягивающих, сжимающих и изгибающих нагрузок

Сравнительный анализ прочностных характеристик изоляции RR и VPI выявил существенную температурную зависимость их механических свойств (рис. 4–6). При комнатной температуре изоляция VPI демонстрирует преимущество по прочности и жесткости, особенно при изгибе, что объясняется повышенным содержанием армирующего наполнителя.

Критически важным является поведение материалов при рабочей температуре 155°C. Для изоляции VPI наблюдается резкое снижение прочностных характеристик (в 4–5,5 раз), в то время как изоляция RR сохраняет стабильность с уменьшением показателей не более чем на 30–40%. Высокая прочность при сжатии в направлении Z у обоих материалов обеспечивается наличием непрерывных слоев стеклоткани.

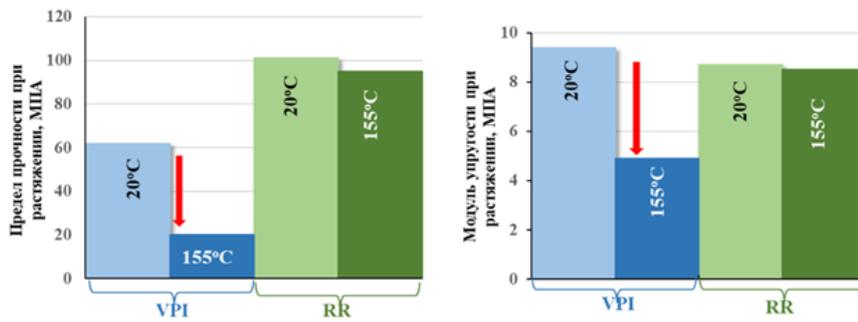


Рис. 4. Физико-механические характеристики вариантов изоляции при растяжении

Fig. 4. Physical and mechanical characteristics of tension insulation options

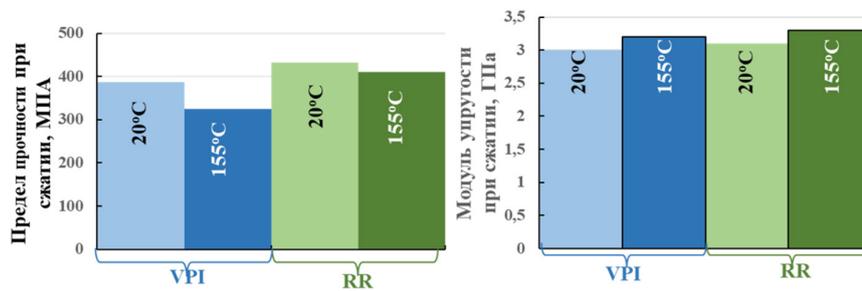


Рис. 5. Физико-механические характеристики вариантов изоляции при сжатии

Fig. 5. Physical and mechanical characteristics of compression insulation options

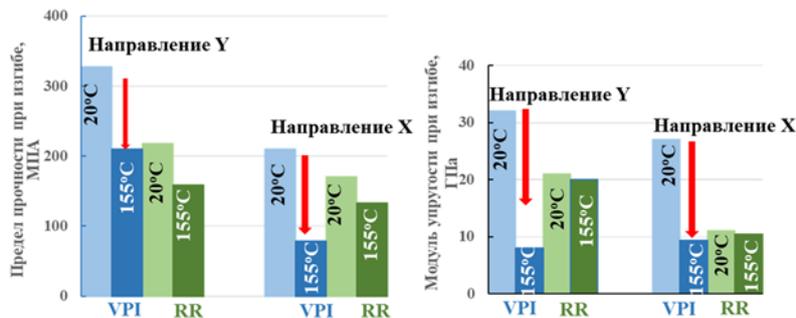


Рис. 6. Физико-механические характеристики вариантов изоляции при изгибе

Fig. 6. Physical and mechanical characteristics of bending insulation options

Полученные значения предела прочности существенно превышают расчетные эксплуатационные нагрузки [2] и согласуются с литературными данными [13]. Температурная стабильность изоляции RR делает ее предпочтительной для работы в условиях повышенных термических воздействий.

Характеристики изоляции при сдвиговых воздействиях

Для слоистой композиционной изоляции ключевое значение имеет прочность межслойного сцепления, определяющая монолитность конструкции и стойкость к развитию межслойных разрядов [2, 5]. Экспериментальные исследования выявили существенную анизотропию адгезионных характеристик, зависящую от направления приложения нагрузки.

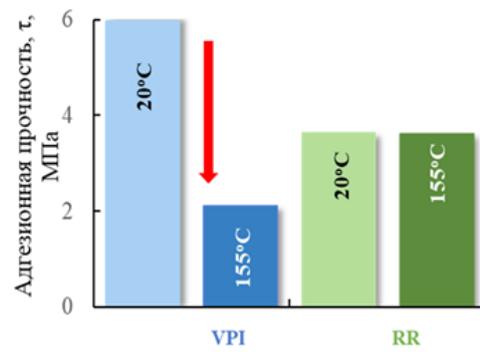


Рис. 7. Результаты определения межслоевой адгезионной прочности
Fig. 7. Results of the determination of interlayer adhesive strength

Для изоляции RR прочность при межслойном сдвиге составила 7,2 МПа в направлении Y и 3,6 МПа в направлении X. Указанные различия обусловлены технологическими особенностями нанесения изоляции – повышенной шероховатостью контактирующих поверхностей в зоне перекрытия лент. Наименьшее значение адгезионной прочности (не более 1 МПа) зафиксировано при испытаниях на отрыв в направлении Z.

Температурные испытания демонстрируют сохранение выявленных закономерностей: при 155°C адгезионная прочность изоляции VPI снижается в 2,5 раза, тогда как для изоляции RR остается практически неизменной (рис. 7). Полученные данные подтверждают общую тенденцию термической стабильности характеристик изоляции RR и повышенной чувствительности VPI к температурным воздействиям, что согласуется с результатами механических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб.

Возможные причины снижения механических характеристик при повышении температуры

Проведенный сравнительный анализ выявил существенную разницу в поведении исследуемых типов изоляции при термовоздействии. Все механические характеристики изоляции VPI демонстрируют значительное снижение при повышении температуры от комнатной до 155°C, в то время как изоляция RR сохраняет стабильность в этом температурном диапазоне. Для установления причин наблюдаемой деградации проведен комплексный анализ потенциальных факторов влияния.

Первоначально исследована гипотеза о влиянии степени отверждения полимерной матрицы на термическую стабильность. Проведены дополнительные эксперименты по увеличению продолжительности отверждения с 12 до 20 часов. Результаты показали отсутствие статистически значимого изменения тангенса диэлектрических потерь (0,036 против 0,034 при 155°C) и не выявили улучшения механических характеристик – модуль упругости сохраняется на уровне 4,9 ГПа, предел прочности составляет 53 МПа. Эти данные свидетельствуют о достижении максимальной степени отверждения в стандартных технологических условиях и позволяют исключить влияние технологического фактора на наблюдаемую термическую деградацию.

Установлено, что доминирующим фактором, определяющим различие в термическом поведении, является химическая природа связующих систем. Для изоляции VPI на основе диановых эпоксидных смол температура стеклования составляет 110–115°C, что подтверждается резким снижением модуля упругости при статическом изгибе в этом температурном диапазоне (рис. 8). Переход через температуру стеклования приводит к значительному увеличению сегментальной подвижности макромолекул и, как следствие, к снижению механических характеристик.

В отличие от этого, изоляция RR на основе эпоксиноволачных смол демонстрирует сохранение механических характеристик до температур свыше 160°C, что свидетельствует о более

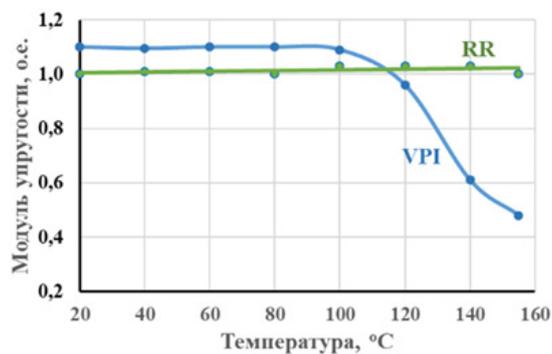


Рис. 8. Зависимость модуля упругости при изгибе E_i от температуры изоляции RR и VPI
 Fig. 8. Dependence of the bending modulus of elasticity E_i on the insulation temperature RR and VPI

высокой температуре стеклования данной системы. Более плотная сшитая структура эпоксидноволачного связующего обеспечивает сохранение жесткости полимерной матрицы в рабочем диапазоне температур. Термогравиметрический анализ дополнительно подтверждает более высокую термическую стабильность изоляции RR: температура 5%-ной потери массы составляет 394°C против 342°C для изоляции VPI. Это различие объясняется большей термоокислительной стабильностью химической структуры эпоксидноволачного связующего.

Таким образом, снижение механических характеристик изоляции VPI при рабочих температурах является следствием фундаментальных различий в химической структуре связующих систем. Хотя это снижение не оказывает прямого влияния на электрическую прочность в статических условиях, оно может приводить к изменению вибрационных характеристик обмотки, ослаблению системы крепления и, как следствие, к интенсификации разрядных процессов в динамических режимах работы генератора. Данное обстоятельство требует строгого контроля температурного режима эксплуатации для изоляции типа VPI и учета температурной зависимости механических характеристик при проектировании систем крепления обмотки.

Определение ТКЛР

Сохранение стабильного механического контакта в системе «токоведущая часть — корпусная изоляция — паз статора» при циклических термических воздействиях представляет собой критически важную задачу, решение которой требует точных данных о температурном расширении композиционной изоляции. Нарушение этого контакта вследствие несоответствия ТКЛР компонентов системы может привести к развитию вибрационной эрозии, ослаблению крепления и возникновению разрядных явлений в пазовой части.

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников выявил значительный разброс значений ТКЛР для слюдосодержащей изоляции — от 8 до $15,6 \cdot 10^{-6}$ 1/K [13]. Детальное изучение методик измерений, приведенных в литературе, показало, что такой широкий диапазон значений, вероятно, обусловлен отсутствием в большинстве публикаций четких указаний о направлении измерений относительно структурной анизотропии материала, а также различиями в методах определения коэффициента расширения.

Проведенные экспериментальные исследования выявили выраженную анизотропию коэффициента линейного расширения (табл. 1). В направлениях X и Y, соответствующих плоскости изоляции, значения ТКЛР находятся в диапазоне $8-12 \cdot 10^{-6}$ 1/K, что хорошо согласуется с литературными данными для слюдосодержащих композитов. Напротив, в направлении Z (перпендикулярно плоскости слоев) зафиксированы значительно более высокие значения — от 25 до $90 \cdot 10^{-6}$ 1/K, причем разброс значений коррелирует с содержанием связующего и качеством термопрессования.

Таблица 1

Значения ТКЛР изоляции RR при температуре 120°C при разном содержании компонентов

Table 1

Values of the coefficient of linear expansion of insulation RR
at a temperature of 120°C with different component contents

Направление нагрузки	Значение ТКЛР·10 ⁶ 1/К			Содержание компонентов (массовое), %			
	Эксперимент	Расчет для схемы			Слюда	Стеклоткань	Связующее
		1	2	3			
Y	8,4–9,7	44,5	17,5	15,2	44,6	17,2	38,1
X	12,3–12,2						
Z	42,4–89,7						
Y	9,7–10,1	39,1	15,0	14,2	50,4	19,5	30,1
X	9,1–9,2						
Z	25,8–48,4						

Полученные экспериментальные данные демонстрируют хорошее соответствие с значениями ТКЛР эпоксидного связующего ($50-70 \cdot 10^{-6}$ 1/град) [13–16] и подтверждают положения работы [7] о превышении ТКЛР изоляции в направлении Z над ТКЛР стали статора в 3,2 раза. Это несоответствие создает предпосылки для возникновения значительных термических напряжений на границе раздела материалов.

Теоретический расчет ТКЛР (α) при известных значениях объемных долей компонентов (V_i) для трех схем соединения компонентов в композите: 1 – параллельной ($\alpha = \sum \alpha_i \cdot V_i$), 2 – последовательной ($\alpha = \sum \alpha_i / V_i$), 3 – статистической смеси ($\alpha = \prod \alpha_i^{V_i}$) для слюдосодержащей изоляции (α_i – ТКЛР компонентов: слюда – $8 \cdot 10^{-6}$ 1/К, стекло – $10 \cdot 10^{-6}$ 1/К, связующее – $70 \cdot 10^{-6}$ 1/К) – подтверждает экспериментально наблюдаемое значительное увеличение коэффициента расширения в направлении, перпендикулярном слоям изоляции.

Выявленная значительная анизотропия ТКЛР имеет критическое значение для проектирования систем пазового крепления обмотки и предотвращения развития разрядных процессов в пазовой части генератора. Однако полученные результаты требуют дополнительного экспериментального подтверждения и уточнения в части влияния технологических параметров изготовления изоляции на величину температурного расширения.

Изменение физико-механических характеристик изоляции в процессе теплового старения

Известно, что в процессе эксплуатации на изоляцию электрических машин действует комплекс факторов: электрические, механические, тепловые и другие нагрузки. Как правило, все они ведут к ухудшению характеристик изоляции – происходит так называемое старение материала. При длительном воздействии высокой рабочей температуры на изоляцию класса F (155°C) образуются поры, трещины и в целом снижается содержание связующего, что ведет к снижению монолитности всей изоляционной конструкции. Наиболее уязвимой компонентой к тепловому старению является полимерное связующее изоляции. Под действием высокой температуры и окислителей происходит так называемая термоокислительная деструкция органической компоненты. Тепловое старение изоляции обмотки статора представляет собой

сложный физико-химический процесс, обусловленный необратимыми изменениями в структуре полимерного связующего. При длительном воздействии повышенных температур происходят следующие основные процессы: постотверждение остаточных функциональных групп, окисление макромолекул, термическая деструкция сшитой структуры и образование летучих продуктов. Эти процессы приводят к изменению молекулярной массы, степени сшивки и, как следствие, механических характеристик материала. Как известно, скорость химической реакции зависит от температуры. Соответственно, повышение температуры относительно рабочего уровня позволяет интенсифицировать протекание химических реакций, т.е. ускорить тепловое старение и тем самым смоделировать воздействие эксплуатационного фактора.

Для количественной оценки долговечности изоляции и сравнительных оценок двух систем изоляции (RR и VPI) был применен метод ускоренного теплового старения в соответствии с испытаниями на нагревостойкость по ГОСТ 27710-88. Ускоренное тепловое старение при трех температурных режимах (180, 200 и 220°C) соответствует принципу ускорения старения с шагом 20°C выше температуры класса нагревостойкости F (155°C). Тепловое старение проводилось циклически, в перерывах между циклами часть образцов изоляции подвергалась разрушающему контролю. Чем выше температура старения, тем быстрее будут происходить изменения в изоляции, поэтому длительности циклов были выбраны следующим образом. Продолжительность единичных циклов старения составляла 17 (180°C), 6 (200°C) и 2 (220°C) суток соответственно. Количество циклов старения составляло не менее пяти. Это обеспечивало сопоставимую степень деградации материала на разных температурных уровнях.

В качестве контролируемых индикаторов в процессе теплового старения изоляции были выбраны механические характеристики изоляции. Мониторинг механических характеристик после каждого цикла старения выявил следующие закономерности:

- все виды механических характеристик (предел прочности при растяжении, сжатии, изгибе и модули упругости) изменяются синхронно и однонаправленно;
- сохраняется установленное ранее соотношение между значениями характеристик при комнатной температуре и 155°C;
- изоляция RR демонстрирует более высокую стабильность на всех этапах старения.

Интерпретируя данные по результатам испытаний на тепловое старение, авторы статьи опирались на допущение о том, что «логарифм времени до разрушения образцов линейно зависит от величины обратной термодинамической температуры старения (уравнение Аррениуса), по крайней мере, во всем диапазоне, включающем все испытательные и экстраполируемые точки»¹. Таким образом, для построения математической модели старения было использовано выражение для срока долговечности в форме $\ln t = G + W/(kT)$, выведенное на основе уравнения Аррениуса, где W – энергия активации процесса старения, Дж; k – постоянная Больцмана, эВ/К; t – время до достижения критерия отказа, ч; T – абсолютная температура, К; G – предэкспоненциальный множитель.

Следует иметь в виду, что индикатором теплового старения является не только физическое разрушение материала, но и потеря эксплуатационных свойств, например снижение сопротивления изоляции или уровня пробивного напряжения и др. Выбор такого индикатора или критерия конечной точки (ККТ) представляет собой отдельную методическую задачу. Использование концепции критической деформации ($\epsilon_{кр} = 1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-4}$ [13]), при которой происходит потеря материалом электрической прочности, оказалось невозможным, так как расчетные значения критических напряжений $\sigma_{кр}$ существенно ниже (в 5÷30 раз) экспериментально определенных пределов прочности. Поэтому в качестве ККТ было выбрано снижение механической прочности на 50% относительно исходного уровня, то есть $ККТ = \sigma_{50\%}$ (что равносильно $\ln ККТ = \ln \sigma_{50\%}$). Для многих изоляционных материалов и систем такой ККТ является весьма распространенным

¹ Государственный комитет СССР по стандартам. Материала электроизоляционные. ГОСТ 27710-88. 1988. 55 с.

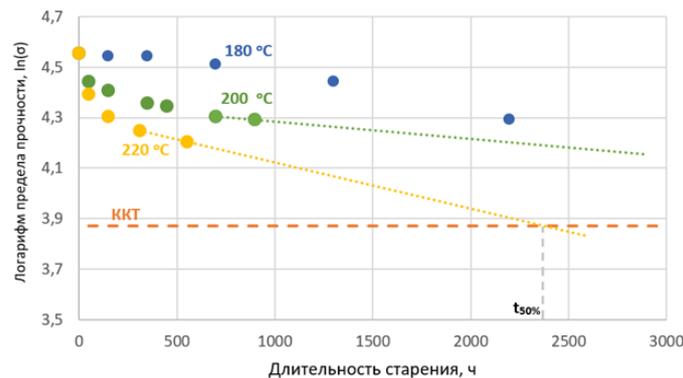


Рис. 9. Изменение предела прочности при растяжении в процессе теплового старения изоляции RR при трех температурах старения

Fig. 9. Change in tensile strength during thermal ageing of RR insulation at different temperatures

(см. ГОСТ 10518-88). Несмотря на то, что в проведенных испытаниях 50%-ное снижение характеристик не было достигнуто, для температур 200 и 220°C наблюдалась стабилизация скорости старения по механическим характеристикам, то есть кривая старения принимает линейный характер в логарифмическом масштабе. Для определения параметров закона теплового старения с заданной степенью достоверности необходимы результаты испытания на тепловое старение по крайней мере при трех повышенных температурах. Однако для получения сравнительных оценок долговечности достаточно и двух, поскольку в логарифмических координатах закон старения дает прямую $\ln t = f(1/T)$ с двумя априори неизвестными коэффициентами. В рамках предположения, что скорости теплового старения для температур 200 и 220°C установились, зависимости $\ln \sigma = f(t)$ были экстраполированы до пересечения с уровнем $\ln \text{ККТ} = \ln \sigma_{50\%}$ (рис. 9). По точкам пересечения были определены времена достижения ККТ для двух температур старения $t_{50\%}$: для 200°C – 7085 ч (не отображена на графике рис. 9), для 220°C – 2383 ч.

Далее по значениям обратных температур старения в абсолютных единицах и соответствующих сроков долговечности $t_{50\%}$ были определены параметры закона теплового старения, как например для RR изоляции:

$$\ln t_{50\%} = \ln G + \frac{W}{kT} = a + b \frac{1}{T}; \quad (2)$$

$$200^\circ\text{C}: \ln 7085 = a + b \frac{1}{200 + 273}; \quad (3)$$

$$220^\circ\text{C}: \ln 2383 = a + b \frac{1}{220 + 273}; \quad (4)$$

$$\Rightarrow a = -17,99, b = 12704. \quad (5)$$

Из полученных параметров закона теплового старения также можно определить энергию активации процесса старения. Она пропорциональна углу наклона линейной функции $\ln(t_{50\%}) = f(1/T)$ и может быть найдена путем умножения углового коэффициента на постоянную Больцмана.

По результатам обработки данных испытаний по ускоренному тепловому старению получены следующие выражения для долговечности:

- для изоляции RR: $\ln(t_{50\%}) = -17,99 + 12704 \cdot (1/T)$, $W = 1,09$ эВ,
- для изоляции VPI: $\ln(t_{50\%}) = -14,63 + 11107 \cdot (1/T)$, $W = 0,95$ эВ.

Значения энергии активации теплового старения согласуются с литературными данными (0,88–1,09 эВ [13]). Используя полученные выражения, можно спрогнозировать время $t_{50\%}$ для максимальной рабочей температуры, которая для класса нагревостойкости F составляет 155°C.

Таким образом, спрогнозированное время достижения 50%-ного снижения предела прочности $t_{50\%}$ при растяжении изоляции, эксплуатируемой при 155°C, превышает требования ГОСТ 8865-93, который для класса нагревостойкости предписывает сохранение не менее 50% от исходного уровня механических характеристик после 20000 часов эксплуатации изоляции:

- для изоляции RR – в 13,6 раза;
- для изоляции VPI – в 9,4 раза.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточном запасе долговечности исследуемых материалов и подтверждают возможность их применения в высоковольтных ТГ с учетом температурного режима эксплуатации.

Заключение

В работе изучены физико-механические характеристики при растяжении сжатии, изгибе, межслойном сдвиге и температурном расширении корпусной композиционной слюдосодержащей изоляции обмотки статора высоковольтных генераторов, изготовленной по двум технологическим вариантам – технологии пропитанных лент (RR) и технологии вакуум-нагнетательной пропитки (VPI) – в исходном состоянии и в процессе ускоренного теплового старения.

Экспериментально подтверждена термическая стабильность изоляции RR: при повышении температуры от 20 до 155°C предел прочности при изгибе снижается всего на 30–40% (со 100 МПа до 60–70 МПа), а модуль упругости сохраняется на уровне 85–90% от исходного значения. Это обусловлено высокой температурой стеклования эпоксиноволачного связующего (> 160°C).

Обнаружено критическое снижение характеристик изоляции VPI при рабочей температуре: при 155°C предел прочности при изгибе уменьшается в 4–5,5 раз (со 120 МПа до 22–30 МПа), а модуль упругости снижается с 15 ГПа до 3–4 ГПа. Данное явление обусловлено низкой температурой стеклования дианового связующего (110–115°C) и требует строгого контроля температурного режима эксплуатации.

Определена выраженная анизотропия ТКЛР материала корпусной изоляции: в направлении Z (перпендикулярно слоям) коэффициент расширения составляет $25-90 \cdot 10^{-6}$ 1/К, что в 3,0–3,5 раза превышает значения в плоскости изоляции ($8-12 \cdot 10^{-6}$ 1/К) и в 2,5–3,0 раза выше ТКЛР стали статора ($11 \cdot 10^{-6}$ 1/К). Данный фактор необходимо учитывать при расчетах термических напряжений в системе крепления обмотки.

Ускоренное тепловое старение показало, что при температуре 155°C время достижения 50%-ного снижения механических характеристик для изоляции VPI и RR превышает требования стандарта в 9,4 и 13,6 раз соответственно. Энергия активации процесса старения составляет 0,95–1,09 эВ для обоих материалов.

Полученные количественные данные позволяют рекомендовать изоляцию RR для применений с повышенными термическими нагрузками, в то время как применение изоляции VPI требует дополнительных мер по тепловому контролю и усовершенствованию системы крепления обмотки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Brütsch R., Tari M., Fröhlich K., Weiers T., Vogelsang R.** Insulation failure mechanisms of power generators [Feature article], *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24 (4) (2008) 17–25. DOI: 10.1109/MEI.2008.4581636
- [2] **Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Андреев А.М., Балыков О.С., Баранов В.С., Белько В.О.** Обзор методик оценки технического состояния электрической изоляции обмоток статоров высоковольтных турбогенераторов с воздушным охлаждением, находящихся в эксплуатации // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2025. Т. 18, № 4. С. 90–105. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-90-105
- [3] **Elspace L., Schlegel S., Kosse M.** Detecting thermomechanical ageing of rotating high-voltage machines: investigating the influence of the time between mechanical stress and diagnostic measurement, 2024 *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, (2024) 316–320. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579281
- [4] **Khazanov A., Gegenava A.** Evaluation of the dissection of coils for stator winding for high voltage rotating machines, 2024 *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, (2024) 192–195. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579279
- [5] **Корчагин Н.Ю., Серебрянников С.В., Серебрянников С.С., Черкасов А.П.** Контроль остаточных свойств изоляции турбогенератора // XVIII Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». 2020. С. 18–23.
- [6] **Wong T., Timoshkin I., MacGregor S., Wilson M., Given M.** Dielectric interfaces in high-voltage technology: Overview and theoretical approaches to the modeling of functional and breakdown behavior, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 4 (39) (2023) 34–49. DOI: 10.1109/MEI.2023.10151812
- [7] **Liese M., Brown M.** Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings, *IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 4 (15) (2008) 927–932. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591212
- [8] **Ren W., Du D., Du Y.** Electrical contact resistance of connector response to mechanical vibration environment, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2 (10) (2020) 212–219. DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2935478
- [9] **Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., Железняк В.Н.** Повышение эксплуатационной надежности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки // *Глобальная энергия*. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–89. DOI: 10.18721/JEST.29305
- [10] **Шевчук Р.Э., Гаев А.В.** Метод приближенного решения задачи о колебаниях сердечников статоров // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2017. Т. 23, № 1. С. 98–106. DOI: 10.18721/JEST.230110
- [11] **Железняк В.Н., Коровкин Н.В.** Повышение мощности короткого замыкания ударных генераторов для обеспечения эксплуатационных режимов // *Электричество*. 2022. № 11. С. 46–55. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-11-46-55
- [12] **Чишко С.Д.** Исследование электродинамических процессов в торцевой зоне статора турбогенератора в переходных режимах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2024. 28 с.
- [13] **Пак В.М., Трубачев С.Г.** Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 2007. 416 с.
- [14] **Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Chernyshev D.A.** Mechanical characteristics of insulation system materials characteristics for high-voltage generators, 2024 *Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*, (2024) 589–593. DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468416
- [15] **Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Chernyshev D.A.** Investigation of mechanical characteristics of pressuring materials of generators stator winding in thermal aging process, 2023 *Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP)*, (2023) 27–30. DOI: 10.1109/MDP60436.2023.10424112

- [16] **Ivanov I.O., Reznik A.S., Feklistov E.G., Shikova T.M., Fedotov N.A., Petrenya Y.K.** Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2022) 1017–1021. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755593
- [17] **Bolotin V.V.** Mechanics of delaminations in laminate composite structures, *Mechanics of Composite Materials*, 37 (2001) 367–380. DOI: 10.1023/A:1014210527476
- [18] **Gegenava A., Khazanov A.** Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. “Three Steps Test” TST, 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/EIC55835.2023.10177305
- [19] **Nikolaev A., Khazanov A., Gegenava A.** Optimization of thermal cycle testing setup of bars of high-voltage turbo generator, 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2025) 1–6. DOI: 10.1109/EIC63069.2025.11123276
- [20] **Cimino A., Jenau F., Staubach C.** Finite-element-model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines, 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), (2019) 1–4. DOI: 10.1109/UPEC.2019.8893473
- [21] **Cimino A., Staubach C., Jenau F.** Analysis of accelerated multi-factor aging tests on the winding insulation system of generator stator bars used in large rotating machines, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2018) 110–113. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481029
- [22] **Huang X., Ji S., Xu M., Zhang F.** Aging state evaluation of oil-paper insulation based on electro-mechanical impedance technology, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 31 (5) (2024) 2853–2856. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3433321
- [23] **Hu S., Zhang M., Liu J., Zhang W., Maksimenko S.** Study on the Change Rule of Electro-Optical Frequency Dielectric Characteristics in Epoxy Resin Insulation Systems Under Multifactorial Combined Aging, 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–5. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122992
- [24] **Zhou B., Cai F., Gao K., Xue J.** Comparative study on key aging characteristics of XLPE material for high-voltage cables with different service years, 2025 4th International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET), (2025) 73–76. DOI: 10.1109/ICEPET65469.2025.11047299
- [25] **Ogbonna V.E., Popoola A.P.I., Popoola O.M.** Assessment of mechanical and dielectric behaviour of sintered E-CR glass reinforced polyimide composite insulator core for mechanical load-bearing and high voltage insulation applications, 2023 IEEE AFRICON, (2023) 1–3. DOI: 10.1109/AFRICON55910.2023.10293428
- [26] **Wang C., Zhang J., Li Z., Liu J., Zhang M.** Study on the aging mechanism of epoxy impregnated glass fiber composite materials under multi-factor aging, 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–4. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122936

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛЬКО Виктор Олегович – директор Высшей Школы Высоковольтной энергетики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vobelko@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

МАННАНОВ Эмиль Рамилевич – руководитель группы, АО «Силовые машины», канд. техн. наук.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

КОСТЕЛЬОВ Андрей Михайлович – главный специалист по обмоткам турбогенераторов, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-310X>

ФЕДОТОВ Никита Алексеевич – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: nifed4@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

ФЕКЛИСТОВ Ефрем Геннадьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

ШИКОВА Татьяна Михайловна – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: shikova_tm@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-6534>

REFERENCES

- [1] **R. Brüttsch, M. Tari, K. Fröhlich, T. Weiers, R. Vogelsang**, Insulation failure mechanisms of power generators [Feature article], IEEE Electrical Insulation Magazine, 24 (4) (2008) 17–25. DOI: 10.1109/MEI.2008.4581636
- [2] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.M. Andreev, O.S. Balykov, V.S. Baranov, V.O. Belko**, Review of methods for assessing the technical condition of the electrical insulation stator windings of air-cooled turbogenerators in operation, LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science, 18 (4) (2025) 90–105. DOI: 10.32603/2071-8985-2025-18-4-90-105
- [3] **L. Elspass, S. Schlegel, M. Kosse**, Detecting thermomechanical ageing of rotating high-voltage machines: investigating the influence of the time between mechanical stress and diagnostic measurement, 2024 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2024) 316–320. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579281
- [4] **A. Khazanov, A. Gegenava**, Evaluation of the dissection of coils for stator winding for high voltage rotating machines, 2024 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2024) 192–195. DOI: 10.1109/EIC58847.2024.10579279
- [5] **N.Iu. Korchagin, S.V. Serebriannikov, S.S. Serebriannikov, A.P. Cherkasov**, Kontrol' ostatochnykh svoystv izoliatsii turbogeneratora [Control of residual properties of turbogenerator insulation], XVIII Mezhdunarodnaia konferentsiia “Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskie materialy i komponenty” [XVIII International Conference “Electromechanics, Electrotechnology, Electrical Materials and Components”], (2020) 18–23.
- [6] **T. Wong, I. Timoshkin, S. MacGregor, M. Wilson, M. Given**, Dielectric interfaces in high-voltage technology: Overview and theoretical approaches to the modeling of functional and breakdown behavior, IEEE Electrical Insulation Magazine, 4 (39) (2023) 34–49. DOI: 10.1109/MEI.2023.10151812
- [7] **M. Liese, M. Brown**, Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings, IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 4 (15) (2008) 927–932. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591212
- [8] **W. Ren, D. Du, Y. Du**, Electrical contact resistance of connector response to mechanical vibration environment, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2 (10) (2020) 212–219. DOI: 10.1109/TCPMT.2019.2935478

- [9] **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: 10.18721/JEST.29305
- [10] **R.E. Shevchuk, A.V. Gaev**, An approximate solution method to stator core vibration problem, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (1) (2017) 98–106. DOI: 10.18721/JEST.230110
- [11] **V.N. Zheleznyak, N.V. Korovkin**, Increasing the Short-Circuit Capacity of Impact-Excited Generators to Ensure the Required Operation Modes, *Elektrichestvo*, 11 (2022) 46–55. DOI: 10.24160/0013-5380-2022-11-46-55
- [12] **S.D. Chishko**, Issledovanie elektrodinamicheskikh protsessov v tortsevoi zone statora turbogeneratora v perekhodnykh rezhimakh. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Study of electrodynamic processes in the end zone of a turbogenerator stator in transient modes. Kand. tech. sci. diss.], St. Petersburg, 2024.
- [13] **V.M. Pak, S.G. Trubachev**, *Novye materialy i sistemy izolyatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin* [New materials and insulation systems for high-voltage electrical machines], Moscow: Energoatomizdat, 2007. 416 p.
- [14] **N.A. Fedotov, T.M. Shikova, V.O. Belko, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov, D.A. Chernyshev**, Mechanical characteristics of insulation system materials characteristics for high-voltage generators, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), (2024) 589–593. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468416
- [15] **N.A. Fedotov, T.M. Shikova, V.O. Belko, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov, D.A. Chernyshov**, Investigation of mechanical characteristics of pressuring materials of generators stator winding in thermal aging process, 2023 Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP), (2023) 27–30. DOI: 10.1109/MDP60436.2023.10424112
- [16] **I.O. Ivanov, A.S. Reznik, E.G. Feklistov, T.M. Shikova, N.A. Fedotov, Y.K. Petrenya**, Mechanical characteristics investigation of mica-containing insulation of high voltage rotating machines, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2022) 1017–1021. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755593
- [17] **V.V. Bolotin**, Mechanics of delaminations in laminate composite structures, *Mechanics of Composite Materials*, 37 (2001) 367–380. DOI: 10.1023/A:1014210527476
- [18] **A. Gegenava, A. Khazanov**, Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. “Three Steps Test” TST., 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2023) 1–4. DOI: 10.1109/EIC55835.2023.10177305
- [19] **A. Nikolaev, A. Khazanov, A. Gegenava**, Optimization of thermal cycle testing setup of bars of high-voltage turbo generator, 2025 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2025) 1–6. DOI: 10.1109/EIC63069.2025.11123276
- [20] **A. Cimino, F. Jenau, C. Staubach**, Finite-element-model of mechanical stress acting on the electrical insulation system used in rotating machines, 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), (2019) 1–4. DOI: 10.1109/UPEC.2019.8893473
- [21] **A. Cimino, C. Staubach, F. Jenau**, Analysis of accelerated multi-factor aging tests on the winding insulation system of generator stator bars used in large rotating machines, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), (2018) 110–113. DOI: 10.1109/EIC.2018.8481029
- [22] **X. Huang, S. Ji, M. Xu, F. Zhang**, Aging state evaluation of oil-paper insulation based on electro-mechanical impedance technology, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 31 (5) (2024) 2853–2856. DOI: 10.1109/TDEI.2024.3433321
- [23] **S. Hu, M. Zhang, J. Liu, W. Zhang, S. Maksimenko**, Study on the Change Rule of Electro-Optical Frequency Dielectric Characteristics in Epoxy Resin Insulation Systems Under Multifactorial Combined Aging, 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–5. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122992

[24] **B. Zhou, F. Cai, K. Gao, J. Xue**, Comparative study on key aging characteristics of XLPE material for high-voltage cables with different service years, 2025 4th International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET), (2025) 73–76. DOI: 10.1109/ICEPET65469.2025.11047299

[25] **V.E. Ogbonna, A.P.I. Popoola, O.M. Popoola**, Assessment of mechanical and dielectric behaviour of sintered E-CR glass reinforced polyimide composite insulator core for mechanical load-bearing and high voltage insulation applications, 2023 IEEE AFRICON, (2023) 1–3. DOI: 10.1109/AFRICON55910.2023.10293428

[26] **C. Wang, J. Zhang, Z. Li, J. Liu, M. Zhang**, Study on the aging mechanism of epoxy impregnated glass fiber composite materials under multi-factor aging, 2025 IEEE 5th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), (2025) 1–4. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122936

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Victor O. BELKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: vobelko@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8287-5561>

Emil R. MANNANOV – *JSC “Power machines”.*

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

Andrey M. KOSTELOV – *JSC “Power machines”.*

E-mail: Kostelov_AM@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-310X>

Nikita A. FEDOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nifed4@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

Efrem G. FEKLISTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: efrem.feklistov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7189-6567>

Tatyana M. SHIKOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: shikova_tm@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-6534>

Поступила: 16.09.2025; Одобрена: 27.10.2025; Принята: 25.11.2025.

Submitted: 16.09.2025; Approved: 27.10.2025; Accepted: 25.11.2025.

Научная статья

УДК 621.3.013.22

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>



А.Г. Калимов , К.Х.М. Аль Наими

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

 alexanderkalimov@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ИНДУКТИВНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Ветряные турбины демонстрируют значительную изменчивость выходной мощности из-за колебаний ветровых условий, что приводит к проблемам со стабильностью производства энергии. В данном исследовании изучалась интеграция сверхпроводниковых магнитных накопителей энергии (СПИН) для решения возникающих проблем. В ходе исследования были синтезированы схемы управления и преобразования мощности для ветроэнергетических установок, включающих локальные индуктивные накопители энергии. Результаты моделирования показали, что использование СПИН значительно повысило стабильность выходной мощности при изменении условий эксплуатации ветрогенераторов. Использованный подход продемонстрировал потенциал для обеспечения стабильного производства энергии, несмотря на присущую ему зависимость от погодных условий.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветряные турбины, сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии, стабилизация мощности, преобразователи постоянного тока.

Для цитирования:

Калимов А.Г., Аль Наими К.Х.М. Повышение стабильности ветроэнергетических установок за счет использования сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 58–68. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>A.G. Kalimov  , Q.H.M. Al Naimi

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

 alexanderkalimov@gmail.com

IMPROVING THE STABILITY OF WIND POWER PLANTS THROUGH THE USE OF SUPERCONDUCTING INDUCTIVE ENERGY STORAGE DEVICES

Abstract. Wind turbines demonstrate significant dependence of output power on fluctuations in wind conditions, which leads to problems with the stability and quality of energy production. The study explored the integration of superconducting magnetic energy storage devices (SMES) to solve emerging problems. In the course of the study, power management and conversion schemes for wind power plants, including local inductive energy storage, were synthesized. The simulation results showed that the incorporation of SMES significantly increased the stability of the output power when the operating conditions of wind turbines changed. The used approach demonstrated the potential to ensure stable energy production, despite its inherent dependence on weather conditions.

Keywords: renewable energy sources, wind turbines, superconducting inductive energy storage, power stabilization, DC-DC converters.

Citation:

Kalimov A.G., Al Naimi Q.H.M., Improving the stability of wind power plants through the use of superconducting inductive energy storage devices, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 58–68, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31404>

Введение. В последнее время значительное внимание во всем мире уделяется использованию возобновляемых энергетических ресурсов, в том числе за счет увеличения мощности ветряных электростанций [1–3]. Несмотря на заметный прогресс в этой отрасли энергетики, в ней сохраняются чувствительные проблемы, связанные, в частности, со значительной зависимостью эффективности и надежности используемых на практике ветрогенераторов от постоянно меняющихся погодных условий. Хаотичные колебания скорости и направления ветра приводят к нестабильной работе этих установок и усложняют их интеграцию в электрические сети [4–6]. Во многих случаях решение этой проблемы требует применения специальных решений для сглаживания колебаний генерируемой мощности [7–11].

Выработка энергии ветроэнергетической установкой сопровождается колебаниями выходного напряжения из-за переменной скорости ветра. Эти колебания можно сгладить путем включения локальных накопителей энергии в схему устройства согласования ветрогенератора с нагрузкой. Одним из перспективных решений этой проблемы является применение сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии (СПИН) [12–16]. В последнее время интерес к этим устройствам повышается в связи с успехами в развитии технологии производства высокотемпературных сверхпроводниковых материалов. Использование СПИН помогает также предотвратить скачки напряжения, вызванные внезапными изменениями нагрузки.

В случае интеграции ветряных турбин в системы переменного тока СПИН может стать эффективным инструментом для контроля выходной мощности, улучшения динамических свойств системы и повышения ее устойчивости к сбоям. Исследования показали, что электрохимические аккумуляторы для накопления энергии также могут повысить динамическую

стабильность ветроэнергетических систем, компенсируя дисбаланс мощности [17]. Однако из-за относительно высокой частоты колебаний мощности ветра использование аккумуляторов предполагает их частые зарядку и разрядку, что сокращает срок службы батареи.

СПИН в системе управления энергопотреблением ветряных турбин запасает энергию в периоды профицита мощности, расходует ее в периоды низкой выработки и, в конечном счете, стабилизирует мощность при интеграции с электрической сетью. Характерной особенностью СПИН является то, что для его корректной работы требуется вход постоянного тока, в то время как с выхода генератора ветряной турбины подается переменное напряжение. Это обстоятельство требует установки соответствующей системы преобразования энергии. Усовершенствованные алгоритмы управления и механизмы обратной связи повышают эксплуатационные характеристики, обеспечивая стабильную и быстро реагирующую функциональность в условиях колебаний нагрузок и помех в электросети.

Основной целью данной статьи являются разработка и исследование алгоритма работы преобразователя энергии для ветроэнергетической установки средней мощности при включении в его структуру СПИН.

Моделирование преобразователя энергии ветроэнергетической установки

Моделирование ветрогенераторов, системы преобразования и передачи энергии потребителю, а также их интеграция со СПИН имеют решающее значение для понимания их поведения, оптимизации производительности и обеспечения стабильности электросети. В данной работе представлена методология моделирования таких систем. Все результаты расчетов, приведенные в статье, выполнены для ветроэнергетической установки средней мощности. В качестве объекта исследований была выбрана ветряная турбина модели GEV MP C 275/32 с максимальной выходной мощностью 225 кВт производства компании “VERGANT”. Основные параметры ветрогенератора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ветрогенератора GEV MP C 275/32

Table 1

Parameters of the wind generator GEV MP C 275/32

Тип генератора	Синхронный, на постоянных магнитах
Фазное сопротивление статора	0,18 Ом
Потокоцепление, создаваемое магнитами	0,779 Вб
Индуктивность	0,001 Гн
Диаметр ротора	3,2 м
Номинальная механическая выходная мощность	225 кВт
Напряжение	400 В
Базовая скорость ветра	12 м/с

Режимы работы системы управления мощностью ветрогенератора анализировались с использованием программного обеспечения MATLAB Simulink, способного выполнять динамическое моделирование энергосистем. Первоначально синтезировали принципиальную схему системы управления мощностью, показанную на рис. 1, и разработали методологию управления системой, с тем чтобы найти оптимальный режим работы ветрогенератора при различных скоростях ветра, а также в условиях резкого изменения нагрузки.

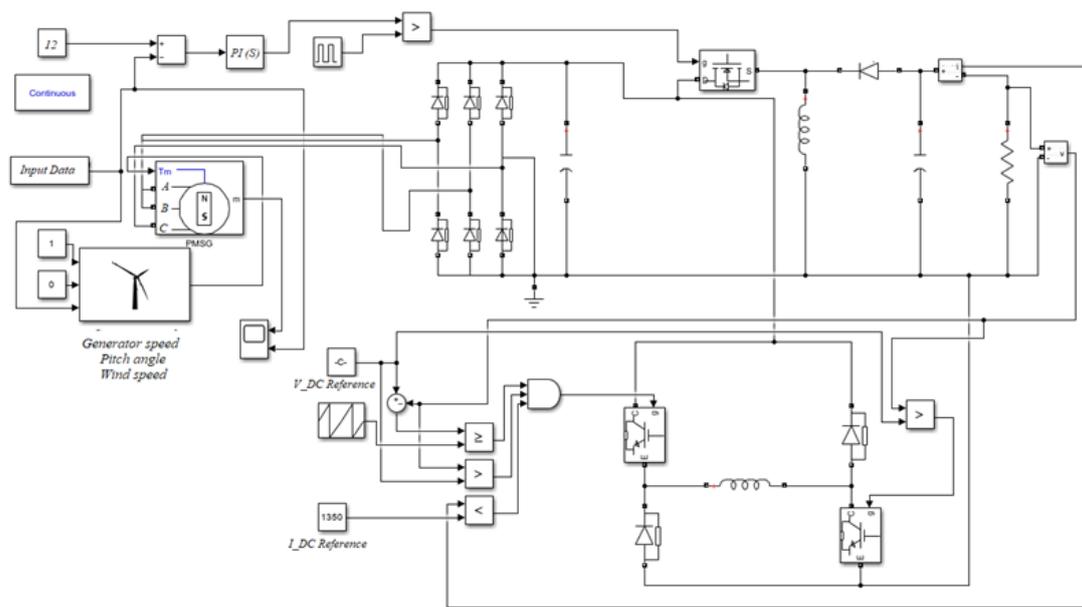


Рис. 1. Модель системы управления мощностью ветрогенератора

Fig. 1. Model of the power regulation system of the wind generator

Приведенная схема содержит структурные элементы, которые можно сгруппировать в следующие блоки:

- ветряная турбина с генератором и блоком регулировки скорости вращения ротора;
- выпрямитель;
- преобразователь постоянного тока DC-DC;
- система накопления энергии на основе СПИН.
- инверторный преобразователь DC-AC.

После выбора общей структуры блок-схемы управления мощностью необходимо выбрать компоненты для ее реализации.

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется с помощью трехфазного неуправляемого выпрямителя, выполненного по полномостовой схеме. Установка проста в реализации и не требует дополнительных систем управления или обратной связи. Она состоит из шести диодов и конденсатора.

Преобразователь постоянного тока (DC-DC конвертер) позволяет повышать или понижать коэффициент передачи по напряжению для стабилизации условий работы нагрузки. Особенностью данного устройства является использование МОП-транзисторов (MOSFET), которые представляют собой устройства с регулируемым напряжением и способностью работать с минимальными потерями энергии. Технология управления затвором МОП-транзистора позволяет системе стабилизировать выходное напряжение путем увеличения напряжения в режиме усиления преобразователя или уменьшения напряжения в режиме понижения напряжения. Управление осуществляется путем подачи пилообразного сигнала на затвор МОП-транзистора. Основные характеристики этого сигнала задаются автоматически с помощью схемы управления, как это показано на рис. 2.

Приведенное ниже уравнение описывает зависимость выходного напряжения преобразователя от параметров используемого рабочего цикла сигнала управления:

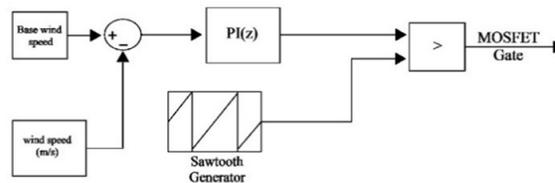


Рис. 2. Схема управления МОП-транзистором
Fig. 2. Control scheme of the MOSFET transistor

$$V_{out} = \frac{D}{1-D} \cdot V_{in}.$$

В зависимости от величины коэффициента заполнения D рабочего цикла преобразователь может работать в режиме понижения (если $D < 0,5$) или в режиме повышения (если $D > 0,5$).

Принципы работы системы управления мощностью при подключении индуктивных магнитных накопителей энергии для ветряных турбин предусматривают использование сверхпроводниковой катушки и силовых электронных устройств. Эти устройства, как правило, представляют собой биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ) или транзисторы других типов и используются для управления основными режимами работы накопителя: зарядка, разрядка и ожидание системы. На рис. 3 представлена принципиальная схема включения СПИН в систему регулирования мощности, которая включает в себя сверхпроводниковую катушку, диоды и силовые электронные компоненты.

Для запуска режима накопления энергии СПИН на затворы БТИЗ1 и БТИЗ2 подается положительное напряжение. В результате БТИЗ переходят в режим зарядки, что обеспечивает поступление энергии в катушку. Эта накопленная энергия затем высвобождается в режиме разрядки СПИН, когда на катоды диодов D1 и D2 подаются положительные напряжения, превышающие их пороговое значение включения. В этом режиме БТИЗ1 и БТИЗ2 отключены, что позволяет накопленной предварительно энергии поступать через диоды в нагрузку.

Режим ожидания активируется при достижении напряжением на шине контрольного значения или при достижении максимально возможной запасенной энергии СПИН. Это состояние достигается путем активации БТИЗ1 и деактивации БТИЗ2, что создает замкнутый контур с БТИЗ1 и D1 для обеспечения протекания постоянного тока внутри СПИН.

Схема управления рабочим состоянием СПИН, представленная на рис. 3, принимает сигнал обратной связи, который содержит информацию об измеренном токе в СПИН и напряжении на нагрузке, и на основе этой информации управляет рабочим состоянием сверхпроводниковой катушки.

На основе этой схемы управления сигнал, подаваемый на затворы МОП-транзисторов, определяет, следует ли открыть или закрыть затворы. Для изучения различных режимов работы СПИН были использованы также данные об изменении скорости ветра. На рис. 4 показано, как скорость ветра изменяется с течением времени. Здесь важно заметить, что оптимальная скорость ветра, которая принималась в расчет при проектировании ветряной турбины, равна 12 м/с.

Результаты моделирования режимов работы ветрогенератора

Разработанная математическая модель системы управления мощностью ветроэнергетической установки была использована для изучения ее реакции на изменения скорости ветра и нагрузки. Внимание в первую очередь обращалось на то, каким образом СПИН влияет на стабилизацию выходной мощности.

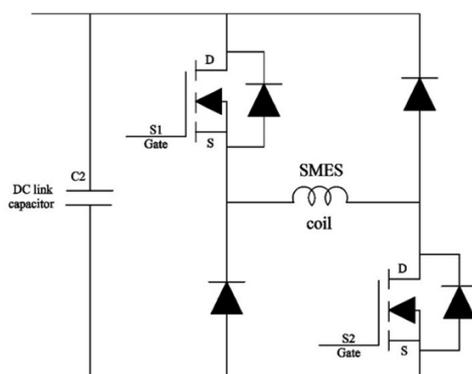


Рис. 3. Включение СПИН в схему управления мощностью

Fig. 3. Control scheme of the power regulation with the SMES

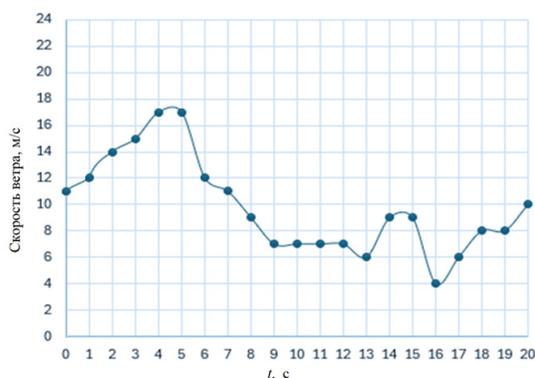


Рис. 4. Изменение скорости ветра в период контроля

Fig. 4. Wind speed variation during the monitoring period

В работе рассматривается процесс включения ветроэнергетической установки в сеть и ее дальнейшей работы при изменяющейся скорости ветра. Продолжительность моделирования составила 20 секунд в непрерывном режиме. Было проведено сравнение режимов работы системы управления мощностью ветрогенератора при подключенном индуктивном накопителе энергии, а также при его отсутствии.

Выходные зависимости тока и напряжения на выходе системы регулирования мощности представлены на рис. 5 и 6. Зелеными линиями показано поведение выходных данных системы в условиях работы подключенного индуктивного накопителя, а красными линиями – аналогичные зависимости для системы без использования СПИН.

Осцилляции тока и напряжения, наблюдаемые на графиках в первые две секунды после начала моделирования, объясняются тем, что ветряная турбина в момент времени $t = 0$ включается и начинает набирать обороты. Дальнейшие изменения этих величин происходят в относительно небольших диапазонах и представляют собой реакцию системы на изменяющуюся скорость ветра.

Обсуждение результатов моделирования

Результаты исследования показывают, что в процессе запуска ветряной турбины с преобразователем мощности, использующей локальную систему накопления энергии, наблюдаются

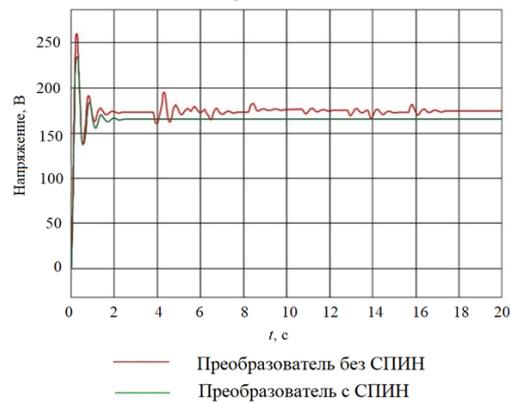


Рис. 5. Напряжение на выходе преобразователя мощности
 Fig. 5. Voltage at the output of the power converter

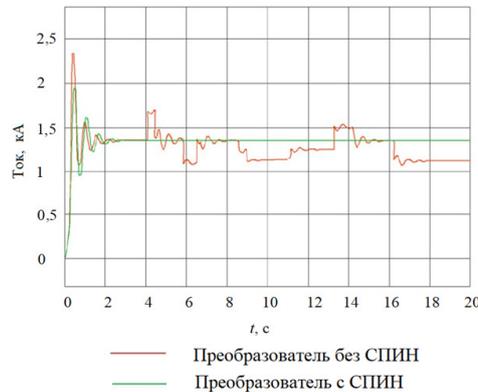


Рис. 6. Ток на выходе преобразователя мощности
 Fig. 6. Current at the output of the power converter

кратковременные колебания выходных сигналов после выхода турбины на рабочий режим. Эти колебания в основном обусловлены нестабильностью скорости и направления ветра. Кроме того, осцилляции могут быть вызваны инерцией лопастей ротора, которые требуют времени для достижения стабильной скорости вращения. Ветряные турбины изначально настраиваются таким образом, чтобы обеспечить оптимальное поглощение энергии, что может привести к нестабильности выходной мощности. Постепенное ускорение скорости вращения ротора вызывает кратковременные изменения электромагнитного потока, влияющие на стабильность напряжения и тока [17].

Для решения этой проблемы можно применить методы плавного пуска, которые помогут смягчить последствия. Эти методы предполагают использование локальных накопителей энергии, что позволяет минимизировать резкие воздействия на систему. Внедрение управляемого процесса инициализации позволяет снизить значительные колебания напряжения и тока, в том числе в процессе включения ветряного генератора. Результаты показали улучшенную стабильность выходных данных в установившемся режиме. Система СПИН значительно улучшила выходные сигналы напряжения, тока и мощности, несмотря на значительные колебания скорости ветра.

При отсутствии накопителя энергии наблюдаются резкие скачки выходного тока (и, как следствие, мощности) ветрогенератора. Это объясняется тем, что такая система регулирования выходной мощности имеет относительно узкий диапазон регулирования и вызывает срывы выходной мощности, если колебания входной мощности выходят за границы этого диапазона. Применение СПИН существенно расширяет диапазон регулирования и предотвращает скачки тока либо значительно уменьшает их амплитуду, как это видно на приведенных диаграммах.

Заключение

СПИН, основанные на использовании высокотемпературных материалов второго поколения, представляют собой перспективную технологию, которая может быть использована для оптимизации работы энергосистем как в качестве самостоятельного устройства, так и в комбинации с другими технологиями, обладающими высокой энергетической эффективностью. Одной из перспективных областей применения СПИН является их интеграция в систему регулирования мощности ветроэнергетических установок. Результаты моделирования, полученные при исследовании режимов работы таких систем с использованием разработанной авторами математической модели для программы MATLAB Simulink, показали положительное влияние СПИН на выходные сигналы тока, напряжения и мощности. Осцилляции этих характеристик существенно снижаются при резком изменении нагрузки и при хаотичном изменении скорости ветра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Киселёв Г.Ю., Скороходов В.И., Боева Л.В., Киселёв Б.Ю. Перспективы использования ветроэнергетики в России // Журнал научных и прикладных исследований. 2016. Т. 1, № 11 (46). С. 80–82.
- [2] Гусева Е.В., Шалимов А.Ю., Богомолов А.Ю., Михненко А.В., Дыгаль А.В. Развитие ветроэнергетики в России и Крыму // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5, № 2. С. 51–55.
- [3] Yunyun Xie, Qiuwei Wu, Ke Wang. Robust MPC-based bidding strategy for wind storage systems in real-time energy and regulation markets, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 124 (2021) 10661. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106361
- [4] Денисенко А.И., Смоловик С.В., Чудный В.С. Динамическое поддержание частоты в энергосистеме за счет асинхронизированного синхронного ветрогенератора // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2022. Т. 87, № 2. С. 5–10.
- [5] Bouendeu J.J., Tella K.F.A., Medjo N.B.A., Tchinda R. Contribution to the improvement of the performances of PV/wind microgrids integrating a hybrid SMES/battery energy storage unit, Journal of Energy Storage, 85 (2024) 111011. DOI: 10.1016/j.est.2024.111011
- [6] Sonia A.K. Dahiya, Improving dynamic stability of wind integrated system by incorporating magnetic energy storage, Energy Storage, 5 (7) (2023) e459. DOI: 10.1002/est2.459
- [7] Ebrahimi S.Y., Dehkordi G.H.R. Application of superconducting magnetic energy storage to compensate the pitch system delay in output power smoothing of wind turbines, IET Renewable Power Generation, 19 (1) (2025) e70107. DOI: 10.1049/rpg2.70107
- [8] Nemdili S., Ngaru I.C., Kerfa M. Solar-wind hybrid power generation system optimization using superconducting magnetic energy storage (SMES), Engineering, Technology & Applied Science Research, 12 (6) (2022) 9515–9522. DOI: 10.48084/etasr.5236
- [9] Salama H.S., Bakeer A., Magdy G., Vokony I. Virtual inertia emulation through virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage in modern power system, Journal of Energy Storage, 44 (B) (2021) 103466. DOI: 10.1016/j.est.2021.103466

- [10] **Komijani A., Kheradmandi M., Sedighizadeh M.** Improving Fault Ride-Through in meshed microgrids with wind and PV by Virtual Synchronous Generator with SFCL and SMES, *Journal of Energy Storage*, 50 (2022) 103952. DOI: 10.1016/j.est.2021.103952
- [11] **Salama H.S., Vokony I.** Voltage and frequency control of balanced/unbalanced distribution system using the SMES system in the presence of wind energy, *Electricity*, 2 (2) (2021) 205–224. DOI: 10.3390/electricity2020013
- [12] **Yuan Weijia.** Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage, London: Springer, 2011. DOI: 10.17863/CAM.13986
- [13] **Калимов А.Г., Баган С., Говор В.М.** Моделирование критического состояния сверхпроводниковых катушек в индуктивных накопителях энергии // *Глобальная энергия*. 2022. Т. 28, № 3. С. 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28301
- [14] **Morandi A., Fabbri M., Gholizad B., Grilli F., Sirois F., Zermeño V.M.R.** Design and comparison of a 1-MW/5-s HTS SMES with toroidal and solenoidal geometry, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (4) (2016) 5700606. DOI: 10.1109/TASC.2016.2535271
- [15] **Скидан А.А., Смирнов В.В., Третьяченко В.Н.** Перспективы применения сверхпроводящих индуктивных накопителей для повышения надежности электроснабжения // *Энергетические установки и технологии*. 2022. Т. 8, № 2. С. 35–39.
- [16] **Смоленцев Н.И.** Сверхпроводящие накопители энергии в современной энергетике, монография. Миасс: ЭТФ ЮУрГУ, 2015.
- [17] **Sagiraju D.K.V., Obulesu Y.P., Choppavarapu S.B.** Dynamic performance improvement of standalone battery integrated PMSG wind energy system using proportional resonant controller, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (4) (2017) 1353–1365. DOI: 10.1016/j.jestch.2017.03.010

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛИМОВ Александр Гелиевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: alexanderkalimov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2978-1894>

АЛЬ НАИМИ Кусай Халед Махмуд – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: qusainaimi95@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5223-872X>

REFERENCES

- [1] **G.Iu. Kiselev, V.I. Skorokhodov, L.V. Boeva, B.Iu. Kiselev,** Perspektivy ispol'zovaniia vetroenergetiki v Rossii [Prospects for wind energy use in Russia], *Zhurnal nauchnykh i prikladnykh issledovaniy* [Journal of Scientific and Applied Research], 1 (11 (46)) (2016) 80–82.
- [2] **Ye.V. Guseva, A.Yu. Shalimov, A.Yu. Bogomolov, A.V. Mikhnenko, A.V. Dygal,** Development of the wind power engineering in Russia and Crimea, *Power plants and technologies*, 5 (2) (2019) 51–55.
- [3] **Yunyun Xie, Qiuwei Wu, Ke Wang,** Robust MPC-based bidding strategy for wind storage systems in real-time energy and regulation markets, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 124 (2021) 10661. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106361

- [4] **A.I. Denisenko, S.V. Smolovik, V.S. Chudny**, Energy system dynamic frequency support by DFIG-based wind generator, *Izvestiya Ntc Edinoj Energeticheskoy Sistemi (STC of Unified Power System Proceedings)*, 2 (87) (2022) 5–10.
- [5] **J.J. Bouendeu, K.F.A. Tella, N.B.A. Medjo, R. Tchinda**, Contribution to the improvement of the performances of PV/wind microgrids integrating a hybrid SMES/battery energy storage unit, *Journal of Energy Storage*, 85 (2024) 111011. DOI: 10.1016/j.est.2024.111011
- [6] **Sonia, A.K. Dahiya**, Improving dynamic stability of wind integrated system by incorporating magnetic energy storage, *Energy Storage*, 5 (7) (2023) e459. DOI: 10.1002/est2.459
- [7] **S.Y. Ebrahimi, G.H.R. Dehkordi**, Application of superconducting magnetic energy storage to compensate the pitch system delay in output power smoothing of wind turbines, *IET Renewable Power Generation*, 19 (1) (2025) e70107. DOI: 10.1049/rpg2.70107
- [8] **S. Nemdili, I.C. Ngaru, M. Kerfa**, Solar-wind hybrid power generation system optimization using superconducting magnetic energy storage (SMES), *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12 (6) (2022) 9515–9522. DOI: 10.48084/etasr.5236
- [9] **H.S. Salama, A. Bakeer, G. Magdy, I. Vokony**, Virtual inertia emulation through virtual synchronous generator based superconducting magnetic energy storage in modern power system, *Journal of Energy Storage*, 44 (B) (2021) 103466. DOI: 10.1016/j.est.2021.103466
- [10] **A. Komijani, M. Kheradmandi, M. Sedighizadeh**, Improving Fault Ride-Through in meshed microgrids with wind and PV by Virtual Synchronous Generator with SFCL and SMES, *Journal of Energy Storage*, 50 (2022) 103952. DOI: 10.1016/j.est.2021.103952
- [11] **H.S. Salama, I. Vokony**, Voltage and frequency control of balanced/unbalanced distribution system using the SMES system in the presence of wind energy, *Electricity*, 2 (2) (2021) 205–224. DOI: 10.3390/electricity2020013
- [12] **Yuan Weijia**, *Second-generation high-temperature superconducting coils and their applications for energy storage*, London: Springer, 2011. DOI: 10.17863/CAM.13986
- [13] **A.G. Kalimov, S. Bagan, V.M. Govor**, Modeling of the superconducting coil critical state in the inductive energy storage systems, *Global Energy*, 28 (03) (2022) 7–17. DOI: 10.18721/JEST.28301
- [14] **A. Morandi, M. Fabbri, B. Gholizad, F. Grilli, F. Sirois, V.M.R. Zermeño**, Design and comparison of a 1-MW/5-s HTS SMES with toroidal and solenoidal geometry, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (4) (2016) 5700606. DOI: 10.1109/TASC.2016.2535271
- [15] **A.A. Skidan, V.V. Smirnov, V.N. Tretyachenko**, The prospects of using superconducting magnetic energy storage to improve the reliability of power supply, *Power plants and technologies*, 8 (2) (2022) 35–39.
- [16] **N.I. Smolentsev**, *Sverkhprovodiashchie nakopiteli energii v sovremennoi energetike [Superconducting energy storage devices in modern energy sector]*, monograph, Miass: ETF IuUrGU, 2015.
- [17] **D.K.V. Sagiraju, Y.P. Obulesu, S.B. Choppavarapu**, Dynamic performance improvement of standalone battery integrated PMSG wind energy system using proportional resonant controller, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (4) (2017) 1353–1365. DOI: 10.1016/j.jestch.2017.03.010

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander G. KALIMOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
 E-mail: alexanderkalimov@gmail.com
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2978-1894>

Qusai Khaled Mahmoud AL NAIMI – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: qusainaimi95@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5223-872X>

Поступила: 04.11.2025; Одобрена: 27.11.2025; Принята: 30.11.2025.

Submitted: 04.11.2025; Approved: 27.11.2025; Accepted: 30.11.2025.

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: В. Липински, А. Риаз, А.Б. Сандовал, И. Скрыбин Оксид церия в солнечном термохимическом производстве возобновляемых видов топлива// 10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет, 2025. С. 3–12. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

В. Липински¹, А. Риаз², А.Б. Сандовал³, И. Скрыбин⁴

¹ Центр исследований энергетики, окружающей среды и водных ресурсов Института Кипра, Никосия, Кипр;

² Duralyze, Эктон, Канберра, Австралия;

³ Институт катализа и нефтехимии Национального исследовательского совета Испании (CSIC), Мадрид, Испания;

⁴ Институт климата, энергетики и борьбы со стихийными бедствиями Австралийского национального университета, Эктон, Австралия

ОКСИД ЦЕРИЯ В СОЛНЕЧНОМ ТЕРМОХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

Введение. Солнечное излучение является обильным источником чистой энергии, который потенциально может удовлетворить глобальный спрос на энергию. Оно непосредственно используется во множестве процессов, включающих фототермическое, фотоэлектрическое, фотохимическое, фотобиологическое и гибридное преобразование. Фототермические процессы преобразования солнечного излучения отличаются тем, что они способны использовать весь спектр солнечного излучения, требуют технологий, в основе которых в основном лежат обычные материалы, и совместимы с широким спектром промышленных применений, требующих вложения тепловой энергии. Высокопоточное солнечное излучение, получаемое с помощью оптических концентраторов, является эффективным источником чистого технологического тепла для проведения высокотемпературных физических и химических процессов. Концентрирующие солнечные коллекторы могут обеспечивать потоки излучения в диапазоне от нескольких кВт·м⁻² до нескольких МВт·м⁻², что позволяет достигать температур в диапазоне от нескольких сотен до более чем 2000 °С. Верхний предел КПД преобразования концентрированного солнечного излучения в полезную энергию (эксергию), такую как электричество, η_{\max} , рассчитывается как произведение КПД поглощения излучения приемником, являющимся абсолютно черным телом с идеальной изоляцией, η_{abs} , и КПД двигателя Карно, η_{Carnot} ,

$$\eta_{\max} = \eta_{\text{abs}} \times \eta_{\text{Carnot}} = \left(1 - \frac{\sigma T_{\text{rec}}^4}{CG}\right) \times \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{rec}}}\right), \quad C = \frac{\dot{Q}}{GA}, \quad (1)$$

где T и T_0 — температура приемника и окружающей среды соответственно, C — среднее значение коэффициента концентрации потока по площади апертуры приемника A , принимающей концентрированную мощность излучения \dot{Q} , G — эталонный поток неконцентрированной солнечной энергии, а $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ — значение постоянной Стефана–Больцмана [8, 9]. По мере увеличения коэффициента концентрирования солнечной энергии значения T и η_{\max} увеличиваются, как видно из рисунка 1. Даже при относительно низких или умеренных

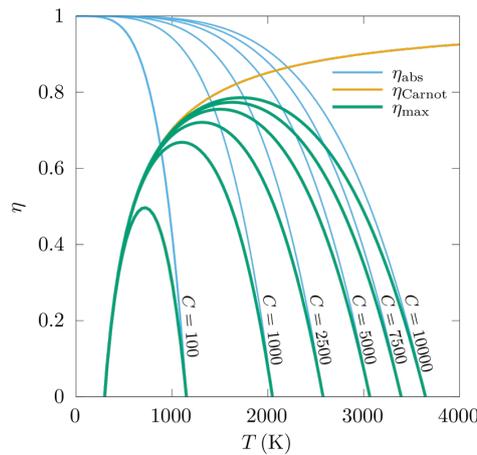


Рис. 1. Верхний предел КПД преобразования концентрированного солнечного излучения в приемнике, представляющем собой абсолютно черное тело, работающем в паре с двигателем Карно, в зависимости от температуры приемника T для различных коэффициентов концентрирования солнечного излучения C и температуры окружающей среды $T_0 = 298,15$ К

значениях коэффициента концентрирования верхний предел КПД значительно превышает продемонстрированные значения эффективности современных технологий концентрирования тепловой энергии солнца (КТЭС). Для повышения общего КПД преобразования солнечной энергии на установке КТЭС требуется уменьшение требуемого размера оптического концентратора (гелиостатического поля). Стоимость оптического концентратора обычно составляет самую большую часть затрат на производственную установку КТЭС, что указывает на настоятельную необходимость продолжения исследований, разработок и инвестиций в этой области для коммерциализации более эффективных и экономичных технологий КТЭС.

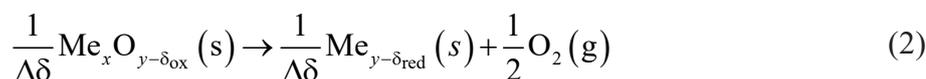
Технологии КТЭС совместимы с недорогими и емкими накопителями высококачественной тепловой энергии, которые удовлетворяют разнообразным потребностям в крупномасштабных системах производства электроэнергии и промышленной переработки. Традиционно двигателем прогресса в области технологий КТЭС являлись достижения в области концентрированной энергии солнца (КЭС), в частности, в контексте крупномасштабной диспетчеризации производства электроэнергии. Солнечная термохимия, область науки и техники на стыке солнечной энергетики и химических технологий, занимается непосредственным термохимическим производством химических видов топлива, таких как водород, спирты, углеводороды и аммиак, а также другими видами термохимической переработки, такими как обжиг известняка и металлургия извлечения, без промежуточного производства электроэнергии, что является перспективным направлением, обеспечивающим высокую эффективность сохранения солнечной энергии в химической форме. Обзоры солнечных термохимических процессов можно найти в работах [5, 10–12]. Идея использования концентрированного солнечного излучения для запуска химических реакций не нова. Он датируется, по крайней мере, XVIII веком и восходит к работам Антуана Лавуазье, который изучал процессы горения в своей солнечной печи, состоящей из двух концентрических линз. В XX веке существенный вклад в исследования по солнечным процессам и реакторам внесли разнообразные новаторские работы, в том числе Тромба и Фоекса, Накамуры, Флетчера и Моэна. На протяжении десятилетий ученые и инженеры продвигались вперед в этой области, чтобы продемонстрировать амбициозную цель — солнечное термохимическое производство синтетического углеводородного топлива из воды и углекислого газа, получаемых из атмосферного воздуха. Солнечные термохимические процессы также исследуются в контексте гибридизации с процессами, основанными на электричестве и сжигании топлива.

Производство синтетических углеводородных топлив, таких как бензин, дизельное топливо и керосин с использованием солнечной энергии, воды и углекислого газа является многообещающим способом повышения глобальной экономии топлива. Такой подход позволяет сохранить существующую инфраструктуру распределения, хранения и использования топлива, что потенциально снижает существенные затраты на переход к углеродно-нейтральной экономике. Это особенно важно для авиационного сектора, в котором сжигание углеводородного топлива используется для приведения в действие силовых установок, не имеющих жизнеспособных альтернатив в ближайшей перспективе, в частности для полетов на дальние и сверхдальние расстояния. Солнечное производство углеродно-нейтрального синтетического углеводородного топлива широко изучалось с использованием разнообразных термохимических процессов для получения компонентов синтез-газа, H_2 и CO , включая окислительно-восстановительные циклы расщепления воды и диоксида углерода и газификацию биомассы.

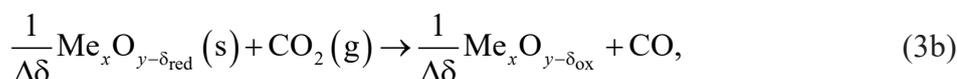
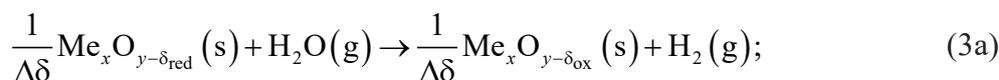
Солнечные термохимические окислительно-восстановительные циклы

Термохимические окислительно-восстановительные циклы на основе оксидов металлов для расщепления воды и углекислого газа имеют ряд преимуществ перед конкурирующими солнечными термохимическими и другими процессами. Они приводятся в действие исключительно концентрированным солнечным излучением при температурах, которые значительно ниже требуемых для реакций прямого термолитиза, что позволяет избежать проблем, связанных с высокотемпературным сильноточным электролизом воды и углекислого газа. Поскольку вода и углекислый газ используются непосредственно в качестве сырья для производства химических продуктов, окислительно-восстановительные циклы могут преодолевать ограничения процессов, связанных с преобразованием ископаемого топлива или биомассы в синтез-газ.

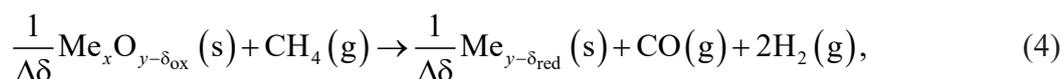
Солнечные термохимические окислительно-восстановительные циклы на основе оксидов металлов для расщепления воды и углекислого газа включают с себя стадию эндотермического восстановления



и стадию экзотермического окисления,



где $Me_x O_{y-\delta_{ox}}$ и $Me_x O_{y-\delta_{red}}$ представляют собой окисленные и восстановленные оксиды металлов соответственно, а $\Delta\delta = \delta_{red} - \delta_{ox}$ — изменение нарушения стехиометрии между восстановленным и окисленным оксидом металла. В менее амбициозном сценарии высокая температура, необходимая для реакции восстановления, снижается путем введения восстановителя, содержащего углерод. Примером процесса является термохимический окислительно-восстановительный цикл на основе оксида металла с расщеплением воды или диоксида углерода в сочетании с частичным окислением метана (ЧОМ), в котором реакция (2) заменяется стадией карботермического восстановления в соответствии с уравнением



в то время как стадия экзотермического окисления, определяемая реакциями (3a) и (3b), остается неизменной.

В контексте солнечного термохимического окислительно-восстановительного цикла были исследованы разнообразные оксиды металлов, соответствующая сводная информация приводится в работах [12, 25]. После выхода исследований Абанадеса и Фламанта, а также Чуэ и Хайле исследовательские усилия в этой области были сосредоточены на совершенствовании окислительно-восстановительного цикла с применением оксида церия (IV). Хотя стехиометрический цикл с применением оксида церия (IV) уже был представлен ранее, работа Чуэ и Хайле была первой, в которой физические и химические свойства оксида церия (IV), включая его высокую ионную проводимость в твердом состоянии и благоприятные термодинамические характеристики, были использованы в нестехиометрических реакциях для термохимического расщепления воды и диоксида углерода. Диоксид церия (IV) стал материалом, который широко изучается для применения в высокотемпературном электрохимическом преобразовании энергии и является краеугольным камнем новых разработок в области солнечного термохимического топлива. Приведенный далее обзор содержит краткие сведения об отдельных аспектах исследований в этой области, но не является полным или исчерпывающим. Более подробные обзоры по этой теме можно найти в работах [31, 32].

Тщательному исследованию подвергались различные аспекты процесса, включая определение характеристик теплофизических свойств оксида церия (IV), разработку различных морфологических структур оксида церия (IV) и разработку солнечных реакторов на основе оксида церия (IV), термодинамический анализ солнечных термохимических окислительно-восстановительных систем на основе оксида церия (IV), а также разработку и демонстрацию комплексного технологического процесса. Для применения в солнечном термохимическом окислительно-восстановительном цикле на основе оксида церия была тщательно изучена микропористая керамика со случайной и упорядоченной пористостью, сетчатая пористая керамика (СПК) с одномасштабной, двухмасштабной и иерархической пористостью. По сравнению с другими морфологическими формами ключевыми преимуществами обладает СПК с двухмасштабной пористостью. Ее крупномасштабная пористость с размерами пор в миллиметровом диапазоне позволяет эффективно пропускать мощный поток солнечного излучения по всему объему. Ее высокая удельная поверхность, обусловленная микропористостью, содержащейся в твердых макроскопических перемычках, способствует поддержанию высоких скоростей реакций между твердым веществом и газом, что особенно важно на стадии окисления в окислительно-восстановительном цикле. Пример двухмасштабной структуры СПК оксида церия (IV), разработанной в Федеральном институте технологий в Цюрихе, показан на рисунке 2.

Исследования в этой области вышли за рамки применения чистого оксида церия (IV), включая разработку оксида церия (IV), легированного переходными металлами, бинарных и тройных соединений на основе Се, а также перовскитных структур, для улучшения способности к обмену кислородом в циклическом режиме работы. Риаз с сотрудниками продемонстрировали высокие показатели производства синтез-газа с использованием сетчатой пористой керамики из смеси оксида церия (IV) и оксида ванадия (V) в окислительно-восстановительном процессе в сочетании с частичным окислением метана с использованием лабораторной установки на базе высокотемпературной печи.

В качестве альтернативных носителей кислорода были предложены структуры из оксидов металлов не на основе церия. Подробный обзор солнечных термохимических окислительно-восстановительных циклов для расщепления воды и углекислого газа можно найти в работе [25].

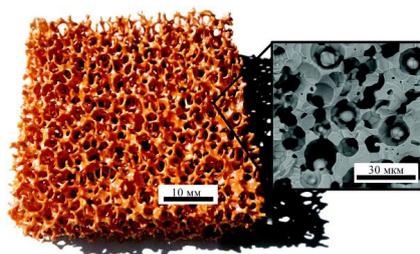


Рис. 2. Фотография образца СПК оксида церия (IV) с двухмасштабной пористостью, полученной с использованием 50 % (по объему) порообразователя. Вставка: Микрофотография СЭМ плоскости излома перемычек. Воспроизведено из [43] без изменений на условиях лицензии Creative Commons (CC-BY-3.0) с разрешения Королевского химического общества

На пути к промышленному производству солнечного топлива

Прогресс в солнечном термохимическом окислительно-восстановительном циклировании на основе оксида церия (IV) для производства возобновляемого углеводородного топлива из отходов был тесно связан с быстрыми достижениями в области улавливания атмосферного углекислого газа, что за последнее десятилетие позволило продемонстрировать всю технологическую цепочку. В 2015 году европейский консорциум SOLARJET впервые в истории экспериментально продемонстрировал производство реактивного топлива с использованием высокотемпературного солнечного термохимического реактора, оснащенного двухслойной сетчатой пористой керамической (СПК) структурой, изготовленной из чистого оксида церия (IV). В этой работе отдельные этапы окислительно-восстановительного цикла последовательно выполнялись с использованием лабораторной установки, испытанной на высокопоточной модельной солнечной установке в Федеральном институте технологий в Цюрихе. Синтез–газ, собранный на выходе из солнечного реактора, затем использовался для синтеза жидких углеводородов в установке Фишера-Тропша, работающей при давлении 150 бар.

Ключевой вехой для дальнейшего прогресса в этой области стала демонстрация производства солнечного топлива с использованием термохимического окислительно-восстановительного цикла на основе оксида церия (IV) в ходе последующего исследования, проведенного группой под руководством Альдо Штайнфельда в Федеральном институте технологий в Цюрихе.

Непрерывный процесс получения углеводородного топлива с использованием солнечного света и воздуха был осуществлен на солнечной установке, называемой первым солнечным нефтеперерабатывающим заводом. В этой системе были интегрированы установка для улавливания углекислого газа и воды из воздуха, солнечная параболическая тарелка с двумя высокотемпературными солнечными реакторами, облицованными структурами СПК из оксида церия (IV) номинальной тепловой мощностью 5 кВт и установка для синтеза Фишера-Тропша. Реакции восстановления и окисления осуществлялись попеременно путем перенаправления концентрированного солнечного излучения между апертурами двух реакторов с помощью подвижного зеркала.

Окончательная демонстрация солнечного термохимического процесса производства синтетического жидкого углеводородного топлива на основе оксида церия (IV) была проведена на башенной солнечной установке в институте IMDEA в Мадриде с подаваемой на реакторы номинальной тепловой мощностью, равной 50 кВт. Последняя система показана на рисунке 3.

Компания Synhelion, дочернее предприятие Федерального института технологий, успешно масштабировала солнечную термохимическую технологию на основе церия для промышленного производства солнечного топлива для наземного, морского и воздушного транспорта. Их завод, расположенный в г. Юлих в Германии, в настоящее время использует в качестве биогенного

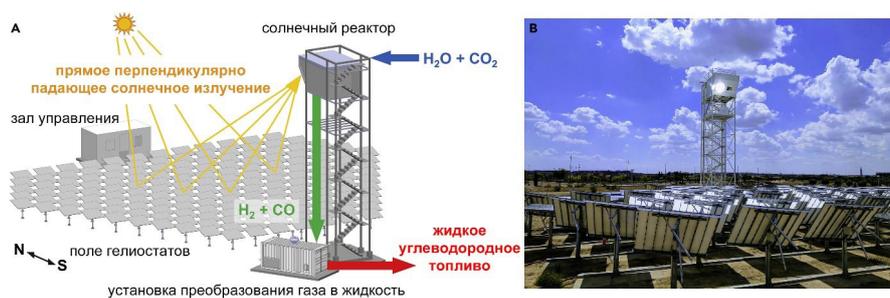


Рис. 3. Башенная солнечная установка для производства возобновляемого жидкого углеводородного топлива: (а) схема всей системы и (б) фотография башенной солнечной установки в институте IMDEA в Мадриде. Воспроизведено без изменений из [19] на условиях лицензии Creative Commons (CC-BY-3.0) с разрешения компании Elsevier

источника углекислого газа и метана биогаз. Их успех показывает, что при дальнейшем использовании огромных ресурсов солнечной энергии в солнечном поясе Земли и обильных запасов углекислого газа в атмосфере Земли технологии использования солнечного термохимического топлива могут стать по-настоящему прорывными путем соляризации глобальной цепочки поставок топлива в масштабах, необходимых для отказа от ископаемого топлива в обозримом будущем. Солнечная термохимия предлагает амбициозные, элегантные и в то же время практичные решения для стабилизации климата Земли и поддержания сбалансированного устойчивого глобального развития, от залитых солнцем пустынь до густонаселенных и энергозатратных регионов, гармонично вписываясь в естественную ткань экосистемы нашей планеты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Corkish R., Lipiński W., Patterson R.** Introduction to solar energy, in: G. Crawley (Ed.), *Solar Energy*, Vol. 2 of World Scientific Series in Current Energy Issues, World Scientific, Singapore, 2016, pp. 1–29. DOI: 10.1142/9789814689502_0001
- [2] **Lewis N.S.** Research opportunities to advance solar energy utilization, *Science* 351 (6271) (2016) aad1920. DOI: 10.1126/science.aad1920
- [3] **Lovegrove K., Stein W. (Eds.)**, *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*, 2nd Edition, Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, Duxford, 2020. DOI: 10.1016/C2018-0-04978-6
- [4] **Blanco M.J., Santigosa L.R. (Eds.)**, *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, Duxford, 2017. DOI: 10.1016/C2014-0-04054-3
- [5] **Lipiński W. (Ed.)**, *Solar Thermochemistry*, Vol. 58 of *Advances in Chemical Engineering*, Academic Press, Cambridge, MA, 2021. URL <https://www.elsevier.com/books/solar-thermochemistry/lipinski/978-0-12-820647-8>
- [6] **Li L., Wang B., Bader R., Cooper T., Lipiński W.** Concentrating collector systems for solar thermal and thermochemical applications, in: W. Lipiński (Ed.), *Solar Thermochemistry*, Vol. 58 of *Advances in Chemical Engineering*, Academic Press, San Diego, 2021, pp. 1–53. DOI: 10.1016/bs.ache.2021.10.001
- [7] **Levêque G., Bader R., Lipiński W., Haussener S.** High-flux optical systems for solar thermochemistry, *Solar Energy* 156 (2017) 133–148. DOI: 10.1016/j.solener.2017.07.046
- [8] **Baum V.A., Aparasi R.R., Garf B.A.** High-power solar installations, *Solar Energy* 1 (1) (1957) 6–12. DOI: 10.1016/0038-092X(57)90049-X

- [9] **Fletcher E.A., Moen R.L.** Hydrogen and oxygen from water, *Science* 197 (4308) (1977) 1050–1056. DOI: 10.1126/science.197.4308.1050
- [10] **Steinfeld A., Palumbo R.** Solar thermochemical process technology, in: R. A. Meiers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Vol. 15, Academic Press, San Diego, 2001, pp. 237–256. DOI: 10.1016/B0-12-227410-5/00698-0
- [11] **Bader R., Lipiński W.** Solar thermochemical processes, in: G. M. Crawley (Ed.), *Solar Energy*, Vol. 2 of World Scientific Series in Current Energy Issues, World Scientific, Singapore, 2016, pp. 345–394. DOI: 10.1142/9789814689502_0009
- [12] **Bader R., Lipiński W.** Solar thermal processing, in: M. J. Blanco, L. R. Santigosa (Eds.), *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, Cambridge, 2017, pp. 403–459. DOI: 10.1016/B978-0-08-100516-3.00018-6
- [13] **Brock W.** *The Norton History of Chemistry*, W.W. Norton, New York, 1993.
- [14] **Trombe F., Foex M.** Essai de metallurgie du chrome par l'hydrogene au four solaire, *Revue de Metallurgie* 48 (5) (1951) 359–362. DOI: 10.1051/metal/195148050359
- [15] **Nakamura T.** Hydrogen production from water utilizing solar heat at high temperatures, *Solar Energy* 19 (5) (1977) 467–475. DOI: 10.1016/0038-092X(77)90102-5
- [16] **Marxer D., Furler P., Scheffe J., Geerlings H., Falter C., Batteiger V., Sizmann A., Steinfeld A.** Demonstration of the entire production chain to renewable kerosene via solar thermochemical splitting of H_2O and CO_2 , *Energy & Fuels* 29 (2015) 3241–3250. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b00351
- [17] **Marxer D., Furler P., Takacs M., Steinfeld A.** Solar thermochemical splitting of CO_2 into separate streams of CO and O_2 with high selectivity, stability, conversion, and efficiency, *Energy & Environmental Science* 10 (5) (2017) 1142–1149. DOI: 10.1039/C6EE03776C
- [18] **Schäpi R., Rutz D., Dähler F., Muroyama A., Haueter P., Lilliestam J., Patt A., Furler P., Steinfeld A.** Drop-in fuels from sunlight and air, *Nature* 601 (2022) 63–68. DOI: 10.1038/s41586-021-04174-y
- [19] **Zoller S., Koepf E., Nizamian D., Stephan M., Patané A., Haueter P., Romero M., González-Aguilar J., Lieftink D., de Wit E., Brendelberger S., Sizmann A., Steinfeld A.** A solar tower fuel plant for the thermochemical production of kerosene from H_2O and CO_2 , *Joule* 6 (7) (2022) 1606–1616. DOI: 10.1016/j.joule.2022.06.012
- [20] **Abdin Z., Zafaranloo A., Rafiee A., Mérida W., Lipiński W., Khalilpour K.** Hydrogen as an energy vector, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 120 (2020) 109620. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109620
- [21] **Nathan G., Jafarian M., Dally B., Saw W., Ashman P., Hu E., Steinfeld A.** Solar thermal hybrids for combustion power plant: A growing opportunity, *Progress in Energy and Combustion Science* 64 (2018) 4–28. DOI: 10.1016/j.peccs.2017.08.002
- [22] **Ansell P.** Review of sustainable energy carriers for aviation: Benefits, challenges, and future viability, *Progress in Aerospace Sciences* 141 (2023) 100919. DOI: 10.1016/j.paerosci.2023.100919
- [23] **Li S., Wheeler V., Kumar A., Venkataraman M., Muhich C., Hao Y., Lipiński W.** Thermodynamic guiding principles for designing non-stoichiometric redox materials for solar thermochemical fuel production: Ceria, perovskites, and beyond, *Energy Technology* 10 (2022) 2000925. DOI: 10.1002/ente.202000925
- [24] **Gao X., Vidal A., Sandoval A.B., Bader R., Hinkley J., Lipiński W., Tricoli A.** Efficient ceria nanostructures for enhanced solar fuel production via high-temperature thermochemical redox cycles, *Journal of Materials Chemistry A* 4 (24) (2016) 9614–9624. DOI: 10.1039/c6ta02187e
- [25] **Bayon A., Hashimoto J., Muhich C.** Fundamentals of solar thermochemical gas splitting materials, in: W. Lipiński (Ed.), *Solar Thermochemistry*, Vol. 58 of *Advances in Chemical Engineering*, Academic Press, Cambridge, MA, 2021, pp. 55–90. DOI: 10.1016/bs.ache.2021.10.006
- [26] **Abanades S., Flamant G.** Thermochemical hydrogen production from a two-step solar-driven water-splitting cycle based on cerium oxides, *Solar Energy* 80 (2006) 1611–1623. DOI: 10.1016/j.Solen-er.2005.12.005

- [27] **Chueh W., Haile S.** A thermochemical study of ceria: exploiting an old material for new modes of energy conversion and CO₂ mitigation, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368 (2010) 3269–3294. DOI: 10.1098/rsta.2010.0114
- [28] **Panlener R.J., Blumenthal R.N., Garnier J.E.** A thermodynamic study of nonstoichiometric cerium dioxide, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 36 (1975) 1213–1222. DOI: 10.1016/0022-3697(75)90192-4
- [29] **Mogensen M., Sammes N.M., Toppsett G.A.** Physical, chemical and electrochemical properties of pure and doped ceria, *Solid State Ionics* 129 (2000) 63–94. DOI: 10.1016/S0167-2738(99)00318-5
- [30] **Inaba H., Tagawa H.** Ceria-based solid electrolytes, *Solid State Ionics* 83 (1996) 1–16. DOI: 10.1016/0167-2738(95)00229-4
- [31] **Lu Y., Zhu L., Agrafiotis C., Vieten J., Roeb M., Sattler C.** Solar fuels production: Two-step thermochemical cycles with cerium-based oxides, *Progress in Energy and Combustion Science* 75 (2019) 100785. DOI: 10.1016/j.peccs.2019.100785
- [32] **Bhosale R.R., Takalkar G., Sutar P., Kumar A., AlMomani F., Khraisheh M.** A decade of ceria based solar thermochemical H₂O/CO₂ splitting cycle, *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (2019) 34–60. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.080
- [33] **Ganesan K., Dombrovsky L., Lipiński W.** Visible and near-infrared optical properties of ceria ceramics, *Infrared Physics & Technology* 57 (2013) 101–109. DOI: 10.1016/j.infrared.2012.12.040
- [34] **Wheeler V., Zapata J., Kreider P., Lipiński W.** Effect of non-stoichiometry on optical, radiative, and thermal characteristics of ceria undergoing reduction, *Optics Express* 26 (10) (2018) A360–A373. DOI: 10.1364/OE.26.00A360
- [35] **Keene D., Lipiński W., Davidson J.** The effects of morphology on the thermal reduction of nonstoichiometric ceria, *Chemical Engineering Science* 111 (2014) 231–243. DOI: 10.1016/j.ces.2014.01.010
- [36] **Li S., Wheeler V., Kreider P., Lipiński W.** Thermodynamic analyses of fuel production via solar-driven non-stoichiometric metal oxide redox cycling—Part I: Revisiting flow and equilibrium assumptions, *Energy & Fuels* 32 (10) (2018) 10838–10847. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02081
- [37] **Li S., Wheeler V., Kreider P., Bader R., Lipiński W.** Thermodynamic analyses of fuel production via solar-driven non-stoichiometric metal oxide redox cycling—Part II: Impact of solid–gas flow configurations and active material composition on system level efficiency, *Energy & Fuels* 32 (10) (2018) 10848–10863. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b02082
- [38] **Chueh W.C., Falter C., Abott M., Scipio D., Furler P., Haile S.M., Steinfeld A.** High-flux solar driven thermochemical dissociation of CO₂ and H₂O using nonstoichiometric ceria, *Science* 330 (2010) 1797–1801. DOI: 10.1126/science.1197834
- [39] **Liang Z., Chueh W., Ganesan K., Haile S., Lipiński W.** Experimental determination of transmittance of porous cerium dioxide media in the spectral range 300–1,100 nm, *Experimental Heat Transfer* 24 (4) (2011) 285–299. DOI: 10.1080/08916152.2010.542876
- [40] **Venstrom L.J., Petkovich N., Rudisill S., Stein A., Davidson J.H.** The effect of morphology on the oxidation of ceria by water and carbon dioxide, *Journal of Solar Energy Engineering* 134 (2012) 011005. DOI: 10.1115/1.4005119
- [41] **Ganesan K., Randrianalisoa J., Lipiński W.** Effect of morphology on spectral radiative properties of three-dimensionally ordered macroporous ceria packed bed, *Journal of Heat Transfer* 135 (12) (2013) 122701. DOI: 10.1115/1.4024942
- [42] **Furler P., Scheffe J., Gorbar M., Moes L., Vogt U.** A. Steinfeld, Solar thermochemical CO₂ splitting utilizing a reticulated porous ceria redox system, *Energy & Fuels* 26 (2012) 7051–7059. DOI: 10.1021/ef3013757
- [43] **Furler P., Scheffe J., Marxer D., Gorbar M., Bonk A., Vogt U., Steinfeld A.** Thermochemical CO₂ splitting via redox cycling of ceria reticulated foam structures with dual-scale porosities, *Physical Chemistry Chemical Physics* 16 (2014) 10503–10511. DOI: 10.1039/C4CP01172D

- [44] **Ackerman S., Takacs M., Scheffe J., Steinfeld A.** Reticulated porous ceria undergoing thermochemical reduction with high-flux irradiation, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 107 (2017) 439–449. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.032
- [45] **Gal A.L., Drobek M., Julbe A., Abanades S.** Improving solar fuel production performance from H₂O and CO₂ thermochemical dissociation using custom-made reticulated porous ceria, *Materials Today Sustainability* 24 (2023) 100542. DOI: 10.1016/j.mtsust.2023.100542
- [46] **Hoes M., Ackermann S., Theiler D., Furler P., Steinfeld A.** Additive-manufactured ordered porous structures made of ceria for concentrating solar applications, *Energy Technology* 7 (2019) 1900484. DOI: 10.1002/ente.201900484
- [47] **Gao X., Di Bernardo I., Kreider P., Tran-Phu T., Zhu Y., Wang N., Cai X., Venkataraman M., Lipton-Duffin J., Bayon A., Lipiński W., Tricoli A.** Lattice expansion in optimally-doped manganese-oxide: An effective structural parameter for enhanced thermochemical water splitting, *ACS Catalysis* 9 (2019) 9880–9890. DOI: 10.1021/acscatal.9b03205
- [48] **Arifin D., Ambrosini A., Wilson S., Mandal B., Muhich C., Weimer A.** Investigation of Zr, Gd/Zr, and Pr/Zr-doped ceria for the redox splitting of water, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 160–174. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.177
- [49] **Le Gal A., Abanades S.** Dopant incorporation in ceria for enhanced water-splitting activity during solar thermochemical hydrogen generation, *Journal of Physical Chemistry C* 116 (2012) 13516–13523. DOI: 10.1021/jp302146c
- [50] **Gokon N., Suda T., Kodama T.** Thermochemical reactivity of 5–15 mol% Fe, Co, Ni, Mn-doped cerium oxides in two-step water-splitting cycle for solar hydrogen production, *Thermochimica Acta* 617 (2015) 13516–13523. DOI: 10.1016/j.tca.2015.08.036
- [51] **Petkovich N.D., Rudisill S.G., Venstrom L.J., Boman D.B., Davidson J.H., Stein A.** Control of heterogeneity in nanostructured Ce_{1-x}Zr_xO₂ binary oxides for enhanced thermal stability and water splitting activity, *Journal of Physical Chemistry C* 115 (2011) 21022–21033. DOI: 10.1021/jp2071315
- [52] **Riaz A., Ali M., Lipiński W., Lowe A.** Enhanced oxygen exchange capacity in nano-structured vanadia–ceria multi-phase oxygen carriers for solar thermal fuel production, *Journal of Materials Chemistry A* 7 (48) (2019) 27347–27360. DOI: 10.1039/C9TA06471K
- [53] **Riaz A., Ali M., Enge T., Tsuzuki T., Lowe A., Lipiński W.** Concentration-dependent solar thermochemical CO₂/H₂O splitting performance by vanadia–ceria multi-phase metal oxide systems, *Research* (2020) 3049534. DOI: 10.34133/2020/3049534
- [54] **Barcellos D., Coury F., Emery A., Sanders M., Tong J., McDaniel A., Wolverson C., Kaufman M., O’Hayre R.** Phase identification of the layered perovskite Ce_xSr_{2-x}MnO₄ and application for solar thermochemical water splitting, *Inorganic Chemistry* 58 (12) (2019) 7705–7714. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.8b03487
- [55] **Riaz A., Bodger C., Chen J., Lowe A., Tsuzuki T., Lipiński W.** Redox performance of ceria–vanadia mixed-phase reticulated porous ceramics for solar thermochemical syngas production, *Energy & Fuels* 35 (2021) 16791–16798. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c01856
- [56] **Kodama T., Hasegawa T., Nagasaki A., Gokon N.** A reactive Fe-YSZ coated foam device for solar two-step water splitting, *Journal of Solar Energy Engineering* 33 (2009) 021008. DOI: 10.1115/1.3090819
- [57] **Muhich C.L., Evanko B.W., Weston K.C., Lichty P., Liang X., Martinek J., Musgrave C.B., Weimer A.W.** Efficient generation of H₂ by splitting water with an isothermal redox cycle, *Science* 341 (2013) 540–542. DOI: 10.1126/science.1239454
- [58] **Riaz A., Kreider P., Kremer F., Tabassum H., Yeoh J., Lipiński W., Lowe A.** Electrospun manganese-based perovskites as efficient oxygen exchange redox materials for improved solar thermochemical CO₂ splitting, *ACS Applied Energy Materials* 2 (4) (2019) 2494–2505. DOI: 10.1021/acsaem.8b01994
- [59] **Huang C., Wu J., Chen Y., Tian M., Rykov A., Hou B., Lin J., Chang C., Pan X., Wang J., Wang A., Wang X.** In situ encapsulation of iron(0) for solar thermochemical syngas production over iron-based perovskite material, *Communications Chemistry* 1 (2018) 55. DOI: 10.1038/s42004-018-0050-y

[60] Zeng D., Cui D., Lv Y., Qiu Y., Li M., Zhang S., Xiao R. A mixed spinel oxygen carrier with both high reduction degree and redox stability for chemical looping H₂ production, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 1444–1452. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.062

[61] Isarapakdeetham S., Kim-Lohsoontorn P., Wongsakulphasatch S., Kiatkittipong W., Laosiripojana N., Gong J., Assabumrungrat S. Hydrogen production via chemical looping steam reforming of ethanol by Ni-based oxygen carriers supported on CeO₂ and La₂O₃ promoted Al₂O₃, *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020) 1477–1491. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.077

[62] Sehaqui H., Gálvez M.E., Becatinni V., Ng Y.C., Steinfeld A., Zimmermann T., Tingaut P. Fast and reversible direct CO₂ capture from air onto all-polymer nanofibrillated cellulose–polyethylenimine foams, *Energy Science & Technology* 049 (2015) 3167–3174. DOI: 10.1021/es504396v

[63] Sanz-Pérez E.S., Murdock C.R., Didas S.A., Jones C.W. Direct capture of CO₂ from ambient air, *Chemical Reviews* 116 (2016) 11840–11876. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00173

[64] Sun J., Zhao M., Huang L., Zhang T., Wang Q. Recent progress on direct air capture of carbon dioxide, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 40 (2023) 100752. DOI: 10.1016/j.Cogsc.2023.100752

[65] <https://synhelion.com>, accessed 24 July 2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛИПИНСКИ Войцех – профессор Центра исследований энергетики, окружающей среды и водных ресурсов Института Кипра.

РИАЗ Асим – генеральный директор, основатель компании *Duralyze*.

САНДОВАЛ Алисия Байон – научный сотрудник Института катализа и нефтехимии Национального исследовательского совета Испании (CSIC).

СКРЯБИН Игорь – менеджер по исследованиям и развитию бизнеса (в сфере энергетики) Института климата, энергетики и борьбы со стихийными бедствиями Австралийского национального университета.

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.763

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31406>



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

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

✉ abdrahmanova.an@yandex.ru

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕИСТЫХ СТРУКТУР ИЗ ТЕРМОПОЛИУРЕТАНА ТПУ 95А С УПРАВЛЯЕМОЙ ПОРИСТОСТЬЮ ДЛЯ ПРОТЕЗНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ 3D-ПЕЧАТЬЮ

Аннотация. Функционально-градиентные материалы с управляемой пористостью на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии в сочетании с 3D-печатью открывают новые возможности для создания персонализированных протезных лайнеров переменной жесткости. В работе представлены исследования механических свойств ячеистых структур из термополиуретана ТПУ 95А, изготовленных 3D-печатью (FDM-технология), для применения в функционально-градиентных протезных лайнерах. Проведены циклические испытания на сжатие трех топологий – гироида, поверхности Шварца (Primitive) и сотовой структуры – при пористости 40 и 75% (размер ячейки 10 мм). Установлено, что минимальная печатаемая толщина стенки составляет 0,8 мм без дефектов. По результатам исследований топология гироида продемонстрировала наилучшие результаты модуля упругости, что составило 17 МПа для 40% пористости ячеек и 10 МПа для 75% пористости. Сотовая структура показала наименьшую жесткость и анизотропию. Полученные данные подтверждают возможность создания градиента жесткости за счет варьирования пористости гироидной структуры, что перспективно для персонализированных протезных изделий с оптимизированным распределением нагрузки.

Ключевые слова: аддитивное производство, функционально-градиентный материал, переменная жесткость, трижды периодические поверхности минимальной энергии, персональное протезирование.

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:

Абдрахманова А.Э., Сотов А.В., Зайцев А.И., Попович А.А. Механические свойства ячеистых структур из термополиуретана ТПУ 95а с управляемой пористостью для протезных изделий переменной жесткости, полученных 3D-печатью // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31406>



A.E. Abdrakhmanova ✉, *A.V. Sotov*, *A.I. Zaytsev*, *A.A. Popovich*

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

✉ abdrakhmanova.an@yandex.ru

MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULAR STRUCTURES MADE OF THERMOPOLYURETHANE TPU 95A WITH CONTROLLED POROSITY FOR PROSTHETIC DEVICES OF VARIABLE STIFFNESS, OBTAINED BY 3D PRINTING

Abstract. Functional gradient materials with controlled porosity based on triple periodic minimum surfaces combined with 3D printing open up new possibilities for creating personalized prosthetic liners with variable stiffness. This paper presents research on the mechanical properties of cellular structures made of TPU 95A thermoplastic polyurethane, manufactured using 3D printing (FDM technology), for use in functionally graded prosthetic liners. Cyclic compression tests were performed on three topologies – gyroid, Schwarz surface (Primitive) and honeycomb structure – at porosities of 40 and 75% (cell size 10 mm). It was found that the minimum printable wall thickness is 0.8 mm without defects. According to the research results, the gyroid topology demonstrated the best elastic modulus results, which amounted to 17 MPa for 40% cell porosity and 10 MPa for 75% porosity. The honeycomb structure showed the lowest stiffness and anisotropy. The data obtained confirm the possibility of creating a stiffness gradient by varying the porosity of the gyroid structure, which is promising for personalized prosthetic devices with optimized load distribution.

Keywords: additive manufacturing, functionally graded material, variable stiffness, triple periodic minimum surfaces, personalized prosthetics.

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:

Abdrakhmanova A.E., Sotov A.V., Zaytsev A.I., Popovich A.A., Mechanical properties of cellular structures made of thermopolyurethane TPU 95a with controlled porosity for prosthetic devices of variable stiffness, obtained by 3D printing, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 79–89, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31406>

Введение. Актуальные тенденции протезирования нижних конечностей направлены на преодоление ключевых проблем пациентов через внедрение инноваций. Это достигается благодаря повышению эффективности конструкции, применению мультиматериальных компонентов и внедрению аддитивного производства. У пациентов после ампутации в поздние сроки реабилитации нередко наблюдаются поражения кожных тканей. Их основная причина – локальные напряжения, вызванные нарушением распределения давления и тангенциальных (сдвиговых) напряжений в сочетании с нестабильностью объема культы [1, 2]. Протезный вкладыш (лайнер) служит важным элементом протезного изделия. Располагаясь между жесткой культеприемной гильзой и ампутированной культей, он выполняет критическую роль в распределении нагрузки. Его механические свойства, особенно материал и толщина, напрямую влияют на передачу напряжения, защиту мягких тканей и общую функциональность протеза [3].

Возросший интерес к ячеистым структурам в сочетании с более специализированным программным обеспечением для проектирования дал старт развитию функционально-градиентным материалам (ФГМ) с управляемой пористостью. Среди пористых ФГМ особый интерес представляют структуры на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ). Свойство минимальной поверхности заключается в локальной минимизации ее площади: любой сколь угодно малый ее фрагмент имеет наименьшую площадь при заданной границе. Геометрия ТППМЭ считается одной из самых сложных и не имеющих аналогов. Особый интерес представляют минимальные поверхности, обладающие кристаллической структурой и демонстрирующие трехмерную трижды периодическую регулярность. На основе данных структур можно получить материал с градиентным изменением физико-механических свойств путем изменения пористости. ТППМЭ широко распространены в природе, например, они встречаются в крыльях бабочек, хитиновом покрове ракообразных и растениях [4]. Семейство ТППМЭ отличается большим разнообразием и включает поверхности Шварца (Primitive, Diamond, Hexagonal), Шена (I-WP, Gyroid), Невиуса и прочие типы.

Ключевыми преимуществами проектирования пористого ФГМ на основе ТППМЭ являются:

- 1) возможность точного математического описания геометрической модели, что обеспечивает высокую повторяемость и предсказуемость свойств;
- 2) контроль регулировки функциональных первичных характеристик, таких как пористость или удельная площадь поверхности;
- 3) строгая взаимосвязь между геометрией и свойствами пористой структуры, что открывает широкие возможности для адаптации материалов под конкретные эксплуатационные задачи [5].

В результате оптимизированного проектирования решетчатой структуры становится возможным задавать градиент с различной жесткостью в одном изделии по требованию. Технология 3D-печати представляет собой эффективный способ реализации таких структур благодаря возможности создания изделий со сложной и индивидуализированной геометрией. Более того, такой метод позволяет создавать изделия с кастомизированной внутренней топологией, что способствует увеличению прочностных характеристик с возможностью облегчения конструкции для решения конкретных функциональных задач [6].

Широкая применимость ФГМ на основе ТППМЭ демонстрируется для биологических применений, в основном связанных с регенерацией костных тканей и уменьшением экранирования напряжений, что облегчается благодаря отсутствию острых граней и легкой остеоинтеграции живых клеток в имплант, а также контролируемой жесткости [7–10]. Но в последние годы на потенциал ФГМ обратили внимание исследователи в области протезирования нижних конечностей для решения проблем переменной жесткости протезного изделия с необходимостью равномерного распределения давления на гетерогенные ткани ампутированной конечности [11–14].

На основе исследований в области разрабатываемых ФГМ с переменной жесткостью для области протезирования посредством АП ключевую роль в выборе технологии играет метод создания градиента. Существуют два принципиально разных подхода к созданию градиента жесткости в материале посредством АП:

- 1) управление пористостью [15, 16],
- 2) изменение химического состава [17–19].

Однако проектирование и изготовление изделия из ФГМ с пористой структурой методами АП сопряжено с рядом сложностей. Характерная анизотропия свойств может оказывать значительное влияние на механическое поведение изготавливаемых структур. Кроме того, возможное отклонение между теоретической и фактической плотностями структуры, наличие участков расплавления и пустот, практические пределы пористостей изготавливаемых структур – все это неизбежно оказывает влияние на вес, энергопроводность и упругий отклик [20].

Целью работы является установление количественных зависимостей между топологией, пористостью и модулем упругости ячеистых структур из ТПУ 95А, напечатанных по технологии послойного наплавления материала (FDM), для обоснованного проектирования функционально-градиентных протезных лайнеров нижних конечностей. В рамках исследования определены модули упругости ячеистых структур различных топологий (гиرويد, поверхность Шварца, сотовая структура) при варьировании объемной пористости, что позволяет восполнить существующий пробел в понимании связи «структура—свойства» для данного класса материалов и технологии производства.

Материалы и методы исследования

В данной работе были использованы три разных типа топологии ячеек. Для испытаний на сжатие были выбраны трижды периодические минимальные поверхности. ТППМЭ-структуры демонстрируют ряд таких уникальных свойств, как высокая удельная прочность, малый удельный вес и высокая энергопоглощающая способность. Из всех возможных вариантов ТППМЭ-структур были выбраны гиرويد и Шварц-примитив (рис. 1). Также для сравнения была выбрана двумерная сотовая структура. На основе вышеуказанных топологий были смоделированы образцы размером 20×20×20 мм с размером единичной ячейки 10 мм. Варьируемым параметром являлась толщина стенки: минимальная толщина составила 0,5 мм. Моделирование образцов осуществлялось в программном пакете nTopology.

Образцы изготавливались из коммерчески доступного филамента марки ТПУ 95А производства компании BASF (Германия), где А – твердость по Шор, по FDM-технологии на 3D-принтере K1 производства компании Creality (Китай).

Оценка минимальной и максимальной допустимой пористости была проведена на тестовой печати образцов с топологией гироида. Для этого были подготовлены 9 моделей с различной толщиной стенок: 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 мм. Размер единичной ячейки, тип топологии и размеры образцов не изменялись, но изменялась пористость образцов.

Методика циклического сжатия образцов соответствовала стандарту ГОСТ ISO 7743-2013. Все тесты были выполнены на разрывной машине Zwick/Roell Z100 с нагрузкой до 100 кН. Были испытаны ячеистые образцы кубической формы (30×30×30 мм), имеющие топологии «гиرويد», «Шварц-примитив» и «сотовая», а для сравнения использовался образец без пор (рис. 2).

Условия испытания задавались скоростью деформирования 10 мм/м до уровня 25%. Нагружение осуществлялось по оси Z в направлении, перпендикулярном слоям 3D-печати. Схема испытания была циклической (нагрузка—разгрузка), и каждый образец прошел через четыре полных цикла. Расчет модуля упругости проводился по следующему уравнению:

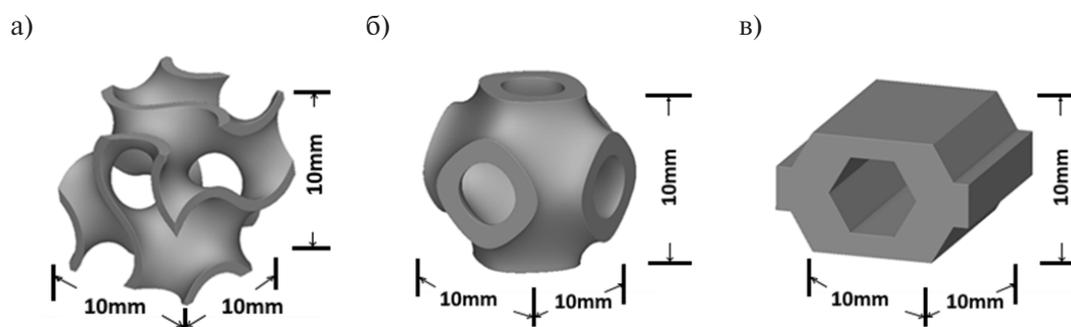


Рис. 1. Внешний вид элементарной ячейки исследуемых ячеистых образцов:

а) топология гироида ТППМЭ; б) топология Шварц-примитив ТППМЭ; в) двумерная сотовая топология

Fig. 1. Appearance of the unit cell of the studied cellular samples:

а) TPMS topology of gyroid; б) TPMS topology of the Schwarz primitive; в) two-dimensional honeycomb topology

$$E = \frac{F_{0,1}}{S\varepsilon_{0,1}}, \quad (1)$$

где F – сила, действующая на образец при сжатии; H ; S – площадь поперечного сечения образца, мм²; ε – деформация образца.

Результаты и обсуждение

Методом тестовой печати и последующего визуального контроля (рис. 3) для материала ТПУ 95А с гироидной топологией был определен диапазон допустимой толщины стенки.

Визуальный контроль и микрофотографии зафиксировали дефекты печати – деляминацию и образование пор на всех образцах, где толщина стенки не достигала 0,8 мм. Таким образом, нижний предел пористости (75%) был определен по минимальной технологичной толщине стенки в 0,8 мм. Верхний же предел (40%) установлен ввиду искажения топологии ячейки, выявленного при САПР-моделировании и сделавшего такие структуры непригодными для исследования. Следовательно, для сравнительного анализа топологий методом FDM был утвержден диапазон пористости от 40 до 75%.

Для оценки упругопрочностных характеристик было проведено четырехцикловое испытание на сжатие. Испытуемая группа включала шесть ячеистых образцов (по два на каждый тип топологии: 40 и 75% пористости, рис. 2) и один образец без пористости для контроля. По данным испытаний построены кривые «деформация–усилие» и определены значения модуля упругости. График циклического испытания для сплошного образца представлен на рис. 4.

Расчетный модуль упругости для сплошного полимера ТПУ 95А составил 43 МПа. Для других образцов также получены кривые цикловых испытаний и произведены расчеты модуля упругости для каждого типа топологии и пористости, результаты представлены в табл. 1.

Полученные данные свидетельствуют об обратной зависимости между пористостью и модулем упругости: снижение первой приводит к увеличению второго. При этом динамика изменения модуля для разных топологий имеет индивидуальный характер.

Во всем диапазоне пористостей минимальный модуль упругости был зафиксирован у сотовой структуры. При сжатии ее ячейки деформировались путем складывания перпендикулярно направлению нагрузки (рис. 5). Эта характерная черта обусловлена двумерностью структуры, обеспечивающей жесткость в плоскости, но низкую сопротивляемость поперечным деформациям. Это делает их менее эластичными и более хрупкими при нагрузках, направленных вне плоскости.

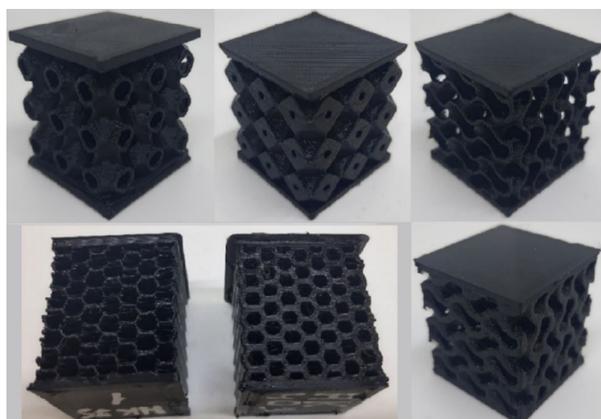


Рис. 2. Печатные образцы 30×30×30 мм для испытаний на циклическое сжатие на основе исследуемых топологий
Fig. 2. 30×30×30 mm printed samples for cyclic compression tests based on the studied topologies

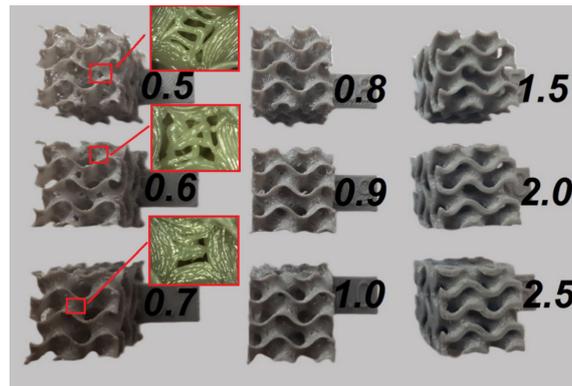


Рис. 3. Тестовые образцы 20×20×20 мм с увеличением толщины стенки ячеек от 0,5 до 2,5 мм
 Fig. 3. Test samples 20×20×20 mm with an increase in cell wall thickness from 0.5 to 2.5 mm

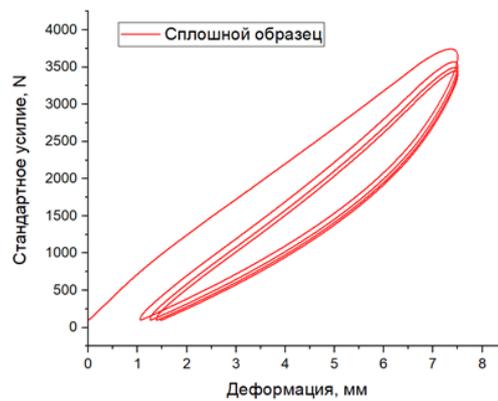


Рис. 4. График цикловых испытаний на сжатие сплошного образца
 Fig. 4. Graph of cyclic compression tests of a solid sample

Таблица 1

Расчетные модули упругости исследуемых топологий и пористостей ячеистых образцов

Table 1

Calculated elastic moduli of the studied topologies and porosities of cellular samples

Пористость, %	Модуль упругости E, МПа		
	Гироид	Шварц-примитив	Сотовая структура
75	10	2	0,9
40	17	13	12

Все исследуемые топологии, за исключением сотовой, в процессе сжатия приобретали бочкообразную форму, а их ячейки компактировались по направлению действия силы. Среди всех пористых структур гироид показал оптимальное сочетание упругости и прочности.

Заключение

В рамках работы проведено исследование механического поведения ячеистых структур, полученных FDM-технологией из полимера ТПУ 95А, с перспективой создания на их основе

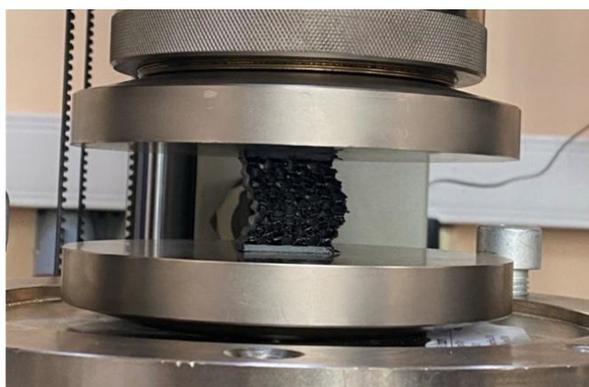


Рис. 5. Характер деформирования топологии сот
 Fig. 5. Behavior of honeycomb topology deformation

ФГМ переменной жесткости для области протезирования нижних конечностей. Были изучены три типа топологий: гироид, поверхность Шварца и сотовые. Результаты показали, что гироидная конфигурация обладает оптимальным комплексом механических свойств благодаря изотропному строению в трехмерном направлении и способности равномерно перераспределять напряжения. В отличие от нее, сотовые структуры, ввиду выраженной двумерной природы и низкой поперечной жесткости, продемонстрировали наименьшие показатели.

Несмотря на полученные результаты работы, существуют некоторые ограничения для создания ФГМ.

Результаты исследования могут быть специфичны для материала ТПУ 95А и FDM-технологии. Для других материалов и методов производства выводы могут отличаться. Влияние дефектов, возникающих при аддитивном производстве, на механические свойства требует дополнительного изучения. Также существует необходимость учета более сложных условий эксплуатации, таких как циклические нагрузки и агрессивные среды.

Данная работа может быть полезна для дальнейшей разработки элемента изделия на основе функционально-градиентного полимерного материала, такого как вкладыш протеза, с учетом реальных условий эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Cagle J.C., Reinhall P.G., Allyn K.J., McLean J., Hinrichs P., Hafner B.J., Sanders J.E. A finite element model to assess transtibial prosthetic sockets with elastomeric liners, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 56 (2018) 1227–1240. DOI: 10.1007/s11517-017-1758-z
- [2] Zhaojian Meng, Duo Wai-Chi Wong, Ming Zhang, Aaron Kam-Lun Leung. Analysis of compression/release stabilized transfemoral prosthetic socket by finite element modelling method, *Medical Engineering & Physics*, 83 (2020) 123–129. DOI: 10.1016/j.medengphy.2020.05.007
- [3] Cherif A.A., Abdelmadjid M., El Sallah Z.M., Ali B., Yaylacı M., Abderahmane S., Özdemir M.E., Dizdar A., Yaylacı E.U., Güvercin Y. Comparative study by FEM of different liners of a transfemoral amputated lower limb, *Scientific Reports*, 15 (2025) 31878. DOI: 10.1038/s41598-025-15974-x
- [4] Al-Ketan O., Abu Al-Rub R.K. Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices, *Advanced Engineering Materials*, 21 (10) (2019) 1900524. DOI: 10.1002/adem.201900524
- [5] Pugliese R., Graziosi S. Biomimetic scaffolds using triply periodic minimal surface-based porous structures for biomedical applications, *SLAS technology*, 28 (3) (2023) 165–182. DOI: 10.1016/j.slant.2023.04.004

- [6] **Devin K.M., Tang J., Hamilton A.R., Moser D., Jiang L.** Assessment of 3D printed mechanical metamaterials for prosthetic liners, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 238 (3) (2024) 348–357. DOI: 10.1177/09544119231225529
- [7] **Wakjira Y., Cioni A., Lemu H.G.** Current status of the application of additive-manufactured TPMS structure in bone tissue engineering, *Progress in Additive Manufacturing*, 10 (2024) 1085–1102. DOI: 10.1007/s40964-024-00714-w
- [8] **A.P. Mall, V.V. Bhandarkar, G. Mandaloi, P. Tandon,** An overview of design and development of biomimetic bone scaffolds using heterogeneous TPMS lattice structures, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32 (2025) 2429–2456. DOI: 10.1007/s11831-024-10212-5
- [9] **N.D.D. Reddy G.G., Penumakala P.K., Narala S.K.R.** Compressive response of additively manufactured Ti–6Al–4V Triply Periodic Minimal Surface structures with different unit cell designs for biomedical implant applications, *Materials Today Communications*, 44 (2025) 112013. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.112013
- [10] **Mahmoud D., Elbestawi M.A.** Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review, *Journal of Manufacturing and materials Processing*, 1 (2) (2017) 13. DOI: 10.3390/jmmp1020013
- [11] **Brown N., Owen M.K., Garland A., DesJardins J.D., Fadel G.M.** Design of a single layer metamaterial for pressure offloading of transtibial amputees, *Journal of Biomechanical Engineering*, 143 (5) (2021) 051001. DOI: 10.1115/1.4049887
- [12] **Moeinnia H.** Optimized design and 3D printing of custom prosthetics utilizing wearable pressure mapping systems, Ph. D. thesis, Burnaby, Canada: Simon Fraser University (SFU), 2025.
- [13] **Sotov A., Abdrakhmanova A., Zaytsev A., Popovich A.** Additive manufacturing of functional gradient thermoplastic composite using fused deposition modelling and coextrusion continuous fibres, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137 (2025) 3587–3601. DOI: 10.1007/s00170-025-15376-3
- [14] **Rouf S., Malik A., Raina A., Ul Haq M.I., Naveed N., Zolfagharian A., Bodaghi M.** Functionally graded additive manufacturing for orthopedic applications, *Journal of Orthopaedics*, 33 (2022) 70–80. DOI: 10.1016/j.jor.2022.06.013
- [15] **Plesec V., Harih G.** Bioinspired design of 3D-printed cellular metamaterial prosthetic liners for enhanced comfort and stability, *Biomimetics*, 9 (9) (2024) 540. DOI: 10.3390/biomimetics9090540
- [16] **Borikar G.P., Patil A.R., Kolekar S.B.** Additively manufactured lattice structures and materials: present progress and future scope, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24 (2023) 2133–2180. DOI: 10.1007/s12541-023-00848-x
- [17] **De Dominicis F.** Design and analysis of multi-material interfaces between rigid and flexible components in prosthetic manufacturing using FDM 3D printing technology, Mag. Thesis, Milan: Politecnico di Milano (Polimi), 2023.
- [18] **Sengeh D.M., Herr H.** A variable-impedance prosthetic socket for a transtibial amputee designed from magnetic resonance imaging data, *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 25 (3) (2013) 129–137.
- [19] **Jindal P., Prakash P., Bassal H., Singh P., Din M.A.M., Barnett C.T., Breedon P.** Two-material-based transtibial socket designs for enhanced load-bearing capacity using FEA, *Prosthesis*, 7 (2) (2025) 30. DOI: 10.3390/prosthesis7020030
- [20] **Gado M.G., Al-Ketan O., Aziz M., Al-Rub R.A., Ookawara S.** Triply periodic minimal surface structures: Design, fabrication, 3D printing techniques, state-of-the-art studies, and prospective thermal applications for efficient energy utilization, *Energy Technology*, 12 (5) (2024) 2301287. DOI: 10.1002/ente.202301287

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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>

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>

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>

ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич – директор ИММТ, 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] J.C. Cagle, P.G. Reinhall, K.J. Allyn, J. McLean, P. Hinrichs, B.J. Hafner, J.E. Sanders, A finite element model to assess transtibial prosthetic sockets with elastomeric liners, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 56 (2018) 1227–1240. DOI: 10.1007/s11517-017-1758-z

[2] Zhaojian Meng, Duo Wai-Chi Wong, Ming Zhang, Aaron Kam-Lun Leung, Analysis of compression/release stabilized transfemoral prosthetic socket by finite element modelling method, *Medical Engineering & Physics*, 83 (2020) 123–129. DOI: 10.1016/j.medengphy.2020.05.007

[3] A.A. Cherif, M. Abdelmajid, Z.M. El Sallah, B. Ali, M. Yaylacı, S. Abderahmane, M.E. Özdemir, A. Dizdar, E.U. Yaylacı, Y. Güvercin, Comparative study by FEM of different liners of a transfemoral amputated lower limb, *Scientific Reports*, 15 (2025) 31878. DOI: 10.1038/s41598-025-15974-x

[4] O. Al-Ketan, R.K. Abu Al-Rub, Multifunctional mechanical metamaterials based on triply periodic minimal surface lattices, *Advanced Engineering Materials*, 21 (10) (2019) 1900524. DOI: 10.1002/adem.201900524

[5] R. Pugliese, S. Graziosi, Biomimetic scaffolds using triply periodic minimal surface-based porous structures for biomedical applications, *SLAS technology*, 28 (3) (2023) 165–182. DOI: 10.1016/j.slast.2023.04.004

[6] K.M. Devin, J. Tang, A.R. Hamilton, D. Moser, L. Jiang, Assessment of 3D printed mechanical metamaterials for prosthetic liners, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 238 (3) (2024) 348–357. DOI: 10.1177/09544119231225529

[7] Y. Wakjira, A. Cioni, H.G. Lemu, Current status of the application of additive-manufactured TPMS structure in bone tissue engineering, *Progress in Additive Manufacturing*, 10 (2024) 1085–1102. DOI: 10.1007/s40964-024-00714-w

[8] A.P. Mall, V.V. Bhandarkar, G. Mandaloi, P. Tandon, An overview of design and development of biomimetic bone scaffolds using heterogeneous TPMS lattice structures, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 32 (2025) 2429–2456. DOI: 10.1007/s11831-024-10212-5

- [9] **G.G. N.D.D. Reddy, P.K. Penumakala, S.K.R. Narala**, Compressive response of additively manufactured Ti–6Al–4V Triply Periodic Minimal Surface structures with different unit cell designs for bio-medical implant applications, *Materials Today Communications*, 44 (2025) 112013. DOI: 10.1016/j.mt-comm.2025.112013
- [10] **D. Mahmoud, M.A. Elbestawi**, Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review, *Journal of Manufacturing and materials Processing*, 1 (2) (2017) 13. DOI: 10.3390/jmmp1020013
- [11] **N. Brown, M.K. Owen, A. Garland, J.D. DesJardins, G.M. Fadel**, Design of a single layer metamaterial for pressure offloading of transtibial amputees, *Journal of Biomechanical Engineering*, 143 (5) (2021) 051001. DOI: 10.1115/1.4049887
- [12] **H. Moeinnia**, Optimized design and 3D printing of custom prosthetics utilizing wearable pressure mapping systems, Ph. D. thesis, Burnaby, Canada: Simon Fraser University (SFU), 2025.
- [13] **A. Sotov, A. Abdrakhmanova, A. Zaytsev, A. Popovich**, Additive manufacturing of functional gradient thermoplastic composite using fused deposition modelling and coextrusion continuous fibres, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 137 (2025) 3587–3601. DOI: 10.1007/s00170-025-15376-3
- [14] **S. Rouf, A. Malik, A. Raina, M.I. Ul Haq, N. Naveed, A. Zolfagharian, M. Bodaghi**, Functionally graded additive manufacturing for orthopedic applications, *Journal of Orthopaedics*, 33 (2022) 70–80. DOI: 10.1016/j.jor.2022.06.013
- [15] **V. Plesec, G. Harih**, Bioinspired design of 3D-printed cellular metamaterial prosthetic liners for enhanced comfort and stability, *Biomimetics*, 9 (9) (2024) 540. DOI: 10.3390/biomimetics9090540
- [16] **G.P. Borikar, A.R. Patil, S.B. Kolekar**, Additively manufactured lattice structures and materials: present progress and future scope, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24 (2023) 2133–2180. DOI: 10.1007/s12541-023-00848-x
- [17] **F. De Dominicis**, Design and analysis of multi-material interfaces between rigid and flexible components in prosthetic manufacturing using FDM 3D printing technology, Mag. Thesis, Milan: Politecnico di Milano (Polimi), 2023.
- [18] **D.M. Sengeh, H. Herr**, A variable-impedance prosthetic socket for a transtibial amputee designed from magnetic resonance imaging data, *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 25 (3) (2013) 129–137.
- [19] **P. Jindal, P. Prakash, H. Bassal, P. Singh, M.A.M. Din, C.T. Barnett, P. Breedon**, Two-material-based transtibial socket designs for enhanced load-bearing capacity using FEA, *Prosthesis*, 7 (2) (2025) 30. DOI: 10.3390/prosthesis7020030
- [20] **M.G. Gado, O. Al-Ketan, M. Aziz, R.A. Al-Rub, S. Ookawara**, Triply periodic minimal surface structures: Design, fabrication, 3D printing techniques, state-of-the-art studies, and prospective thermal applications for efficient energy utilization, *Energy Technology*, 12 (5) (2024) 2301287. DOI: 10.1002/ente.202301287

INFORMATION ABOUT AUTHORS

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

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

Alexander I. ZAYTSEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zaytsev.alexander2011@yandex.ru

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

Anatoliy A. POPOVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: popovicha@mail.ru

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

Поступила: 04.11.2025; Одобрена: 25.11.2025; Принята: 05.12.2025.

Submitted: 04.11.2025; Approved: 25.11.2025; Accepted: 05.12.2025.

Научная статья

УДК 620.193:622.692.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31407>



Г.В. Демьянов, Е.Ю. Глебова ,
И.А. Голубев, А.А. Альхименко, П.Е. Крук

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

 ekaterina_glebova_2013@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ СОВМЕСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ УГЛЕКИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ И АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования синергетического эффекта при совместном воздействии углекислотной коррозии и абразивного износа на низколегированную сталь 09Г2С, используемую в нефтегазовых трубопроводах. Исследование проводилось на специализированном стенде *flow-loop* с имитацией реальных условий эксплуатации, включая параметры потока (до 5 м/с), концентрацию CO₂ (1,2 г/л) и абразивных частиц (песок SiO₂, 4,2 г/л). Скорость деградации материала оценивалась гравиметрическим и электрохимическим (LPR) методами. Результаты показали, что при совместном воздействии коррозии и эрозии общая потеря массы (4,7634 мм/год) превышает сумму потерь от каждого фактора в отдельности (1,7495 и 1,6821 мм/год соответственно), что подтверждает наличие синергетического эффекта. Расчет коэффициента синергии (2,8671 мм/год) и анализ вклада факторов выявили доминирование синергетического взаимодействия (60% от общей деградации), тогда как эрозия и коррозия составили 27% и 13% соответственно. Соотношение $\Delta CR/\Delta ER = 0,117$, согласно ASTM G119-09, соответствует равенству синергетического и аддитивного эффектов со смещением в сторону синергии. Полученные данные имеют практическое значение для прогнозирования ресурса трубопроводов и разработки методов защиты от коррозионно-эрозионного износа. Методика исследования сочетает воспроизводимость натуральных условий с высокой точностью измерений.

Ключевые слова: синергетический эффект, коррозионно-эрозионный износ, углекислотная коррозия, эрозия.

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка комплексной модели надежности, работоспособности и определяющих показателей качества трубопроводных систем северного исполнения» (FEWN-2025-0001). Статья представлена по итогам V международной отраслевой конференции «Материалы и технологии в нефтегазовой отрасли».

Для цитирования:

Демьянов Г.В., Глебова Е.Ю., Голубев И.А., и др. Исследование деградации низколегированной стали в условиях совместного воздействия углекислотной коррозии и абразивного износа // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 90–104. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31407>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31407>

G.V. Demyanov, E.Y. Glebova  ,
I.A. Golubev, A.A. Alkhimenko, P.E. Kruk

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

 ekaterina_glebova_2013@inbox.ru

INVESTIGATION OF LOW-ALLOY STEEL DEGRADATION UNDER COMBINED CARBON DIOXIDE CORROSION AND ABRASIVE WEAR CONDITIONS

Abstract. This paper presents the results of an experimental study on the synergistic effect under the combined action of CO₂ corrosion and abrasive wear on low-alloy steel 09G2S, commonly used in oil and gas pipelines. The study was conducted using a specialized *flow-loop* test bench simulating real operational conditions, including flow velocity (up to 5 m/s), CO₂ concentration (1.2 g/L) and abrasive particles (SiO₂ sand, 4.2 g/L). The material degradation rates were evaluated using gravimetric and electrochemical (LPR) methods. The results demonstrated that under the combined action of corrosion and erosion, the total mass loss (4.7634 mm/year) significantly exceeded the sum of individual corrosion (1.7495 mm/year) and erosion (1.6821 mm/year) losses, confirming the presence of the synergistic effect. The calculated synergy coefficient (2.8671 mm/year) and factor contribution analysis revealed dominant synergistic interaction (60% of total degradation), while pure erosion and corrosion accounted for 27% and 13%, respectively. The $\Delta CR/\Delta ER$ ratio of 0.117 (according to ASTM G119-09) corresponds to the equality of synergistic and additive effects with a shift towards synergy. The obtained data are of practical importance for predicting pipeline service life and developing protection methods against corrosion-erosion wear. The proposed methodology combines field-representative conditions with high measurement accuracy.

Keywords: synergistic effect, corrosion-erosion wear, CO₂ corrosion, erosion.

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Development of a comprehensive model of reliability, performance and key quality indicators of northern pipeline systems” (FEWN-2025-0001). The article is presented following the results of the V International Industry Conference “Materials and Technologies in the Oil and Gas Industry”.

Citation:

Demyanov G.V., Glebova E.Y., Golubev I.A. et al., Investigation of low-alloy steel degradation under combined carbon dioxide corrosion and abrasive wear conditions, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 90–104, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31407>

Введение. При эксплуатации трубопроводов на ряде месторождений в нефтегазовой промышленности одной из актуальных проблем является прогнозирование и защита от углекислотной коррозии [1, 2]. В свободном виде углекислый газ (CO₂) не инициирует коррозионные процессы. Однако при растворении в попутно добываемой воде образуется угольная кислота, которая является причиной коррозии [3]. Углекислотная коррозия имеет специфический характер из-за образования достаточно прочной и сплошной пленки карбоната железа, которая при изменении термодинамических режимов в трубопроводе может откалываться от участка поверхности и вызывать в этом месте локальную коррозию. В общем случае коррозионные процессы являются не единственной причиной деградации материала трубопроводов. В последние годы активно происходит освоение новых месторождений, которые имеют слабосцементированные

песчаные пласты, в связи с чем возникает проблема эрозионного износа трубопровода [4, 5]. Эрозия – процесс деградации материала под действием твердых частиц в потоке флюида [6].

Достаточно подробное рассмотрение вопросов коррозионно-эрозионного износа трубопроводов в условиях кислородной коррозии проведено в [7–9]. Имеется достаточное количество исследований, подтверждающих факт увеличения износа трубопровода при совместном воздействии коррозии и эрозии из-за возникновения синергетического эффекта (СЭ) [10–15]. Также опубликовано стандартное руководство ASTM G119-09 по определению СЭ при совместном воздействии коррозии и эрозии.

Имеется предположение, что эрозия усиливает коррозию из-за того, что она удаляет продукты коррозии с поверхности металла, тем самым ускоряя массоперенос [16]. Сформулирована гипотеза о том, что коррозия повышает шероховатость поверхности материала, тем самым увеличивая эрозию [17, 18]. Данный эффект обусловлен тем, что эрозионные процессы очень чувствительны к углу падения твердых частиц.

Несмотря на обширный опыт в исследовании СЭ коррозионно-эрозионных процессов, до сих пор нет количественной оценки интенсивности процессов в условиях воздействия углекислотной коррозии, приближенных к реальным на месторождении. Поэтому целью данного исследования являлось экспериментальное подтверждение возникновения СЭ при коррозионно-эрозионных испытаниях на специализированном стенде с имитацией реальных условий и с применением электрохимической системы мониторинга скорости коррозии.

Методы и материалы

Конструкция установки

Эксперименты проводились на стендовом комплексе *flow-loop* (рис. 1а). Данное оборудование позволяет воспроизводить гидродинамические условия потока, приближенные к реальным условиям промышленного трубопровода при давлениях до 3 атм. Стенд оснащен датчиками температуры, давления, уровня жидкости. Кроме того, в стенде установлена испытательная секция с образцами исследуемых материалов для измерения электрохимического потенциала и токов коррозии в реальном времени на протяжении всего испытания (рис. 1б). Она представляет собой проточную ячейку с кольцевыми образцами и электродами.

Конструкция стенда позволяет проводить испытания при скорости потока до 5 м/с, а воспроизводимый уровень касательных напряжений на стенке (КНнС) достигает 50 Па.

Экспериментальные параметры

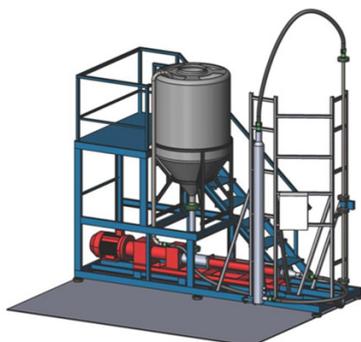
В рамках исследования с целью изучения влияния эрозионного и коррозионного факторов на скорость деградации материала была проведена серия из трех испытаний:

- 1) в условиях чистой эрозии;
- 2) в условиях только углекислотной коррозии;
- 3) при совместном воздействии эрозии и коррозии.

Все типы испытаний проводились при воздействии потока флюида на исследуемую поверхность. В качестве испытуемого материала использовались образцы трубной стали 09Г2С кольцевой формы (рис. 2). Данная марка стали широко применяется в нефтегазовой отрасли для изготовления трубопроводов. Для имитации в потоке абразивных частиц был выбран песок (SiO_2) со средним размером частиц 0,258 мм, концентрация частиц в потоке пластовой воды составляла 4,2 г/л. Данные параметры были выбраны на основании открытых источников по изучению темпов эрозионного износа трубопроводов [4, 19–21].

Для каждого типа испытаний скорость коррозии измерялась гравиметрическим и электрохимическим (LPR) методами. Выбор двух методов обеспечивает возможность как оценки схожимости скоростей коррозии, измеренных разными методами при идентичных условиях, так и сравнения вклада коррозии (LPR) и эрозии (гравиметрия).

a)



б)

Рис. 1. Стендовый комплекс *flow-loop*: а) общий вид установки; б) вид испытательной секции

Fig. 1. Flow-loop test bench: a) general setup view; b) test section view



Рис. 2. Вид исследуемых образцов из 09Г2С

Fig. 2. View of the test specimens made of 09G2S steel

Метод LPR дает информацию о мгновенной скорости коррозии в реальном времени. Гравиметрический метод позволяет оценить фактическое значение потери материала, вид коррозии и среднее значение скорости коррозии за весь период испытаний.

Испытания проводились в течение 6 часов. По завершении каждого эксперимента исследуемые образцы извлекались из ячейки и производился замер потери массы. В табл. 1 приведена матрица условий проведения эксперимента для трех типов испытаний.

Методика испытаний

Подготовка к испытаниям

В начале испытания производилась подготовка флюида, состав которого, а также наличие эрозионных частиц в нем выбирались в соответствии с табл. 1.

Подготовка исследуемой поверхности металла во всех типах испытаний включала шлифовку с использованием абразивной бумаги зернистостью P80–P1500 и полировку с использованием суспензии до $Ra \leq 0,05$ мкм. Потом образец промывали дистиллированной водой, высушивали, взвешивали на аналитических весах и фиксировали его массу до испытаний. Затем всю поверхность, кроме исследуемого участка внутренней нижней части грани площадью ~ 1 см² и точки подвода тока, изолировали влагостойким лакокрасочным покрытием. Непосредственно перед погружением в испытательную секцию исследуемую поверхность металла обезжиривали ацетоном.

После подготовки все электроды фиксировали в испытательной секции стенда, герметизировали, заливали готовый флюид, обеспечивали подвод тока ко всем электродам с помощью прижимных болтов, проверяли чистоту и целостность контактов.

Таблица 1

Матрица коррозионно-эрозионных испытаний

Table 1

Corrosion-erosion test matrix

Тип испытаний	T, °C	Расход, м ³ /час	Общая минерализация, г/л	Минеральный состав	Концентрация CO ₂ , г/л	Концентрация песка, г/л	Средний размер частиц, мм
Коррозия	22	3,2	30,02	3% NaCl + + 0,002% NaHCO ₃	1,2	—	—
Эрозия					—	4,2	0,258
Коррозия-эрозия					1,2	4,2	0,258

При эрозионных испытаниях в испытательную секцию подавали N₂ с расходом 5 л/мин, проводя деаэрацию системы в течение 60 минут. Затем отбирали пробу раствора и измеряли концентрации O₂, CO₂, а также pH. В случае коррозионных и коррозионно-эрозионных испытаний после деаэрации флюид насыщали CO₂ в течение 34 минут с расходом 5 л/мин, отбирали пробу раствора и измеряли концентрацию CO₂ и pH. Условия начала испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры начала испытаний

Table 2

Test initiation parameters

pH	4±0,1
Концентрация O ₂ , ppb	70±10
Концентрация CO ₂ , г/л	1,2±0,1

Если измерения соответствовали значениям, приведенным в табл. 2, фиксировалось время начала испытаний, в противном случае процесс деаэрации или насыщения CO₂ продолжался дополнительно в течение 2 минут с теми же расходами. После всех подготовительных операций включали насос и проводили испытания.

Проведение испытаний

В процессе воздействия флюида на рабочую поверхность исследуемого образца каждые 2 часа производилось измерение сопротивления поляризации R_p . Для этого снималась поляризационная кривая зависимости потенциала от плотности тока E/A , при этом плотность тока не превышала 50 мкА/см² – так агрессивное воздействие на исследуемую поверхность сводилось к минимуму. Далее для каждого измерения проводили расчет сопротивления поляризации по формуле:

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta A}, \quad (1)$$

где ΔE – разность потенциалов, мВ; ΔA – разность плотности тока, мкА.

В конце эксперимента снималась поляризационная кривая зависимости $E/\lg A$, где поляризация проходит в интервале потенциалов от -200 до $+1200$ мВ. По полученной зависимости рассчитывались углы наклона участков катодной и анодной областей и константы Тафеля.

Обработка результатов методом LPR

Расчет скоростей коррозии методом LPR для каждого типа испытания проводится на основании принципа Штерна–Гири [22]. Данный принцип позволяет рассчитать скорость коррозии в мм/год. Коэффициент Штерна–Гири представляет собой соотношение констант Тафеля:

$$B = \frac{b_a b_c}{2,303(b_a + b_c)}, \quad (2)$$

где b_a, b_c – константы Тафеля, полученные как тангенс угла наклона тафелевских кривых. Расчет плотности тока, которая относится к поляризационному сопротивлению через коэффициент Штерна–Гири:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}, \quad (3)$$

где i_{corr} – плотность тока коррозии, мА/см². Расчет теоретических скоростей коррозии по формуле:

$$СК = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} \text{ЭВ}, \quad (4)$$

где $СК$ – скорость коррозии, мм/год; $K_1 = 3,27 \cdot 10^{-3}$ (мм·г)/(мкА·см·год) – коэффициент пропорциональности; ρ – плотность материала ($7,8$ г/см³); i_{corr} – ток коррозии (определяется графическим методом, ток при E_{corr}).

Эквивалентный вес ЭВ рассчитывается по формуле:

$$\text{ЭВ} = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{w_i}}, \quad (5)$$

где n_i – валентность элемента; f_i – массовая доля элемента в соединении; w_i – число атомов элемента.

Расчет СЭ

Компонент скорости эрозии рассчитывается следующим образом:

$$ER_{EC} = WL_{EC} - CR_{EC}, \quad (6)$$

где WL_{EC} – общая потеря массы при коррозионно-эрозионных испытаниях; CR_{EC} – коррозионная составляющая при коррозионно-эрозионных испытаниях, полученная с помощью метода LPR.

Параметры прироста эрозии из-за коррозии (ΔER) и прироста коррозии из-за эрозии (ΔCR) выражаются следующим образом:

$$\Delta ER = ER_{EC} - ER_{PE}; \quad (7)$$

$$\Delta CR = CR_{EC} - CR_{PC}, \quad (8)$$

где ER_{PE} – скорость чистой эрозии; CR_{PE} – скорость чистой коррозии; CR_{EC} – составляющая скорости коррозии в комбинированном процессе эрозии-коррозии.

Тогда чистый СЭ (ΔS) данного процесса описывается с помощью уравнения:

$$\Delta S = \Delta CR + \Delta ER. \quad (9)$$

Общая потеря металла при коррозии-эрозии:

$$WL_{EC} = CR_{PC} + ER_{PE} + \Delta S. \quad (10)$$

Определение основного механизма процесса проводят согласно ASTM G119-09:

$\frac{\Delta CR}{\Delta ER} < 0,1$ – доминируют синергетические эффекты (коррозия влияет на эрозию в большей степени, чем эрозия влияет на коррозию);

$0,1 \leq \frac{\Delta CR}{\Delta ER} < 1$ – воздействия равны;

$\frac{\Delta CR}{\Delta ER} \geq 1$ – доминируют аддитивные эффекты (эрозия влияет на коррозию в большей степени, чем коррозия влияет на эрозию).

Термин «синергетический эффект», согласно ASTM G119-09, обычно используется для обозначения увеличения износа из-за коррозии (ΔCR), а «аддитивный эффект» относится к изменению скорости коррозии из-за износа (ΔER).

Результаты и обсуждение

По завершении серии испытаний для каждого типа условий были получены и усреднены значения скоростей коррозии в мм/год электрохимическим и гравиметрическим методами (табл. 3).

Таблица 3

Результаты экспериментов трех типов испытаний

Table 3

Experimental results of three test types

Тип испытаний	Среднее значение скорости коррозии (гравиметрия), мм/год	Среднее значение скорости коррозии (электрохимия), мм/год
Коррозия	1,7495	0,6099
Эрозия	1,6821	0,3956
Коррозия-эрозия	4,7634	0,9157

На основе усредненных значений скоростей коррозии, измеренных с одинаковым временным интервалом методом LPR в процессе испытаний каждого типа, были построены зависимости скоростей коррозии от времени (рис. 3).

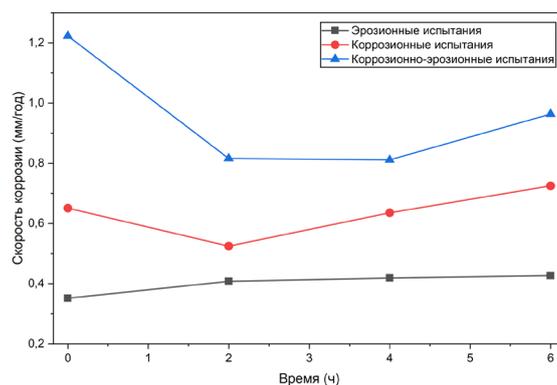


Рис. 3. Зависимость скорости коррозии от времени для трех типов испытаний (по методу LPR)

Fig. 3. Corrosion rate vs time dependence for three test types (LPR data)

В эрозионных испытаниях степень потери металла получилась ниже, чем в коррозионных (рис. 3). Средняя скорость коррозии по методу LPR составила 0,3956 мм/год, а скорость коррозии по гравиметрии – 1,6821 мм/год. В первые 2 часа происходила стабилизация электрохимического потенциала, после чего скорость коррозии росла достаточно плавно. В данной методике измерения скорости коррозии при эрозии присутствовал вклад выдержки образца в коррозионно-активной среде, что следует учитывать при дальнейших расчетах СЭ.

Среднее значение скоростей коррозии в коррозионных испытаниях, полученное методом LPR, составило 0,6099 мм/год, гравиметрическим методом – 1,7495 мм/год (рис. 3). После стабилизации потенциала наблюдался рост скорости коррозии, причем его интенсивность была значительно выше, чем при эрозионных испытаниях.

Результаты коррозионно-эрозионных испытаний сильно превышают значения, полученные в предыдущих двух испытаниях (рис. 3).

Также для сравнения электрохимического и гравиметрического методов измерений были построены столбчатые диаграммы скоростей коррозии для каждого типа испытаний (рис. 4).

В достигнутых результатах отображено (рис. 4), что показания убыли массы, полученные гравиметрическим методом, во всех трех типах испытаний превышают значения скоростей коррозии, полученные в тех же испытаниях, но методом LPR. Это объясняется тем, что гравиметрический метод учитывает больше факторов, влияющих на деградацию металла.

Далее на основе полученных данных проводился расчет СЭ коррозионно-эрозионных испытаний. В табл. 4 приведены результаты расчета коэффициента СЭ.

В данном случае значение коэффициента синергии $\Delta S_{yn} = 2,8671$ мм/год. Для расчета коэффициента СЭ в качестве значения скорости коррозии использовалось значение, полученное методом LPR, эрозии – разность глубинного показателя, полученного гравиметрическим методом, и скорости коррозии, полученной методом LPR. Данный выбор значения обусловлен тем, что таким образом мы исключаем коррозионную составляющую за счет выдержки в коррозионно-активной среде из всего вклада в деградацию, при этом преимущественно остаются факторы, относящиеся к эрозионному воздействию. За значение общей деградации было взято значение глубинного показателя, полученного в коррозионно-эрозионном испытании.

Таким образом, наибольший вклад в общую деградацию материала вносит синергия коррозии и эрозии, она составляет 60%, эрозия – 27%, а коррозия – 13% (рис. 5).

На основе вышеприведенных результатов можно утверждать следующее:

В ходе проведенного эксперимента в условиях, приближенных к реальным (минерализация соответствует данным с месторождений, материал находится под воздействием потока флюида),

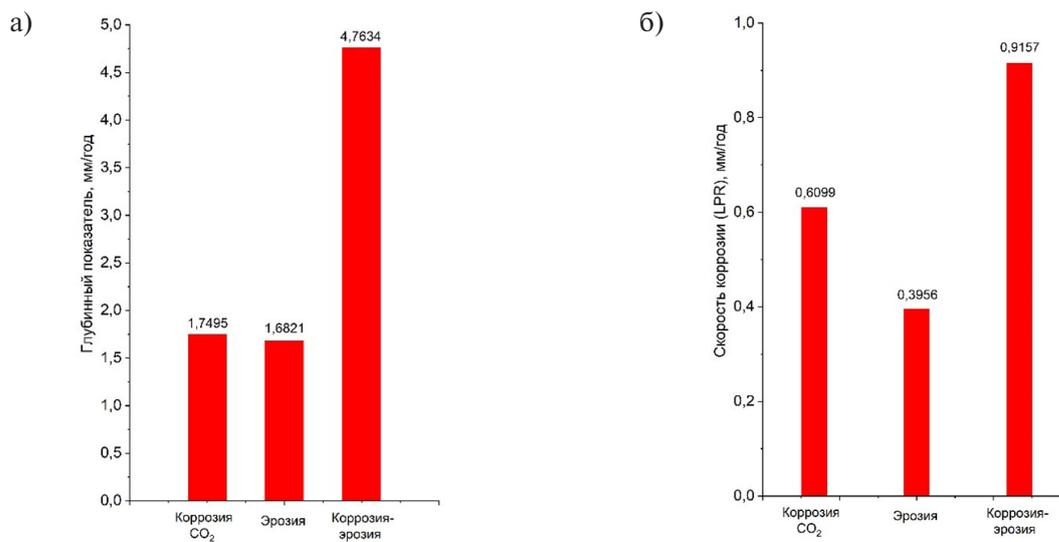


Рис. 4. Сравнение скоростей коррозии в трех типах испытаний, полученных разными методами:
а) гравиметрическим, б) электрохимическим

Fig. 4. Comparison of corrosion rates across three test types obtained by different methods:
a) gravimetric, b) electrochemical

Таблица 4

Расчет коэффициента синергии

Table 4

Synergy factor calculation

Чистая эрозия (ER_{PE}), мм/год	1,2865
Чистая коррозия (CR_{PC}), мм/год	0,6099
Общая потеря при коррозии-эрозии (WL_{EC}), мм/год	4,7634
Скорость коррозии при коррозии-эрозии (электрохимия) (CR_{EC}), мм/год	0,9157
Скорость эрозии при коррозии-эрозии (ER_{EC}), мм/год	3,8477
Приращение эрозии вследствие коррозии (ΔER), мм/год	2,5613
Приращение коррозии вследствие эрозии (ΔCR), мм/год	0,3058
Коэффициент СЭ (ΔS_{yn}), мм/год	2,8671
Общая деградация материала при коррозии-эрозии (WL_{EC})	4,7634

возникает эффект коррозионно-эрозионного синергизма. Это можно увидеть на рис. 4а, где значение деградации материала при коррозионно-эрозионном воздействии превысило сумму потери массы при отдельном воздействии коррозии и эрозии. В данном случае рассматривался именно результат, полученный гравиметрическим методом, так как он учитывает все факторы, влияющие на износ материала. Также, согласно ASTM G119-09, отношение приращения коррозии вследствие эрозии к приращению эрозии вследствие коррозии составило $\frac{\Delta CR}{\Delta ER} = 0,117$,

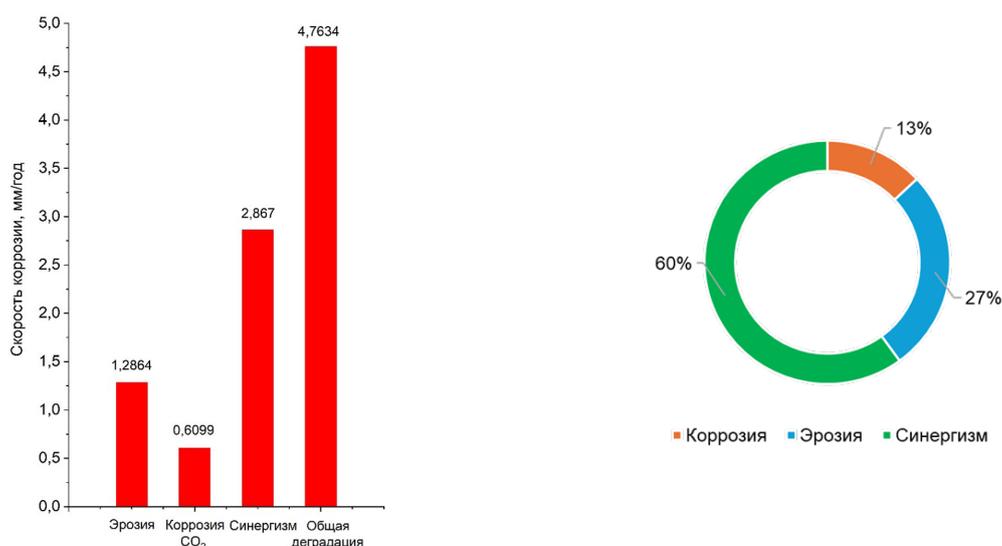


Рис. 5. Результаты оценки вклада коррозии, эрозии и их синергии в общую деградацию материала
 Fig. 5. Contribution assessment of corrosion, erosion and their synergy to the total material degradation

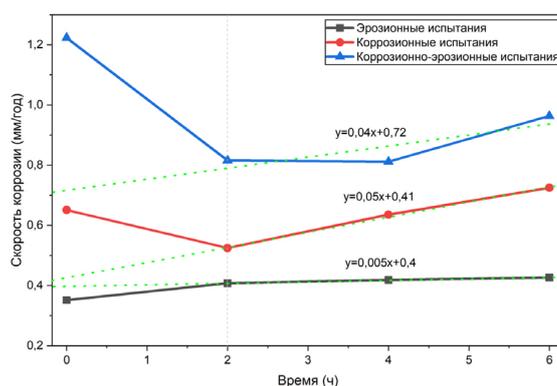


Рис. 6. Зависимость скорости коррозии от времени для трех типов испытаний (по методу LPR) с линейной аппроксимацией участка после стабилизации коррозии
 Fig. 6. Time dependence of the corrosion rate for three tests types (according to LPR) with linear approximation of the site after corrosion stabilization

из неравенства $0,1 \leq 0,12 < 1$ следует, что взаимодействия синергетического и аддитивного эффектов в данном случае равны, при этом виден перевес в сторону синергетического эффекта;

Электрохимический метод также оказался применим для мониторинга скорости коррозии в условиях коррозионно-эрозионного синергизма. Это один из немногих методов, позволяющий получать значения скорости коррозии в реальном времени.

В данном эксперименте с помощью метода LPR изучалась кинетика скорости коррозии в зависимости от условий среды. На рис. 6 видно, что после стабилизации при разных типах испытаний интенсивность роста скоростей коррозии разная.

Производная от полученных линейных уравнений на рис. 6 позволяет оценить интенсивность роста скорости коррозии после участка стабилизации (2 ч). Коэффициенты при уравнениях для коррозионных и коррозионно-эрозионных испытаниях близки по своему значению:

0,05 и 0,04 соответственно. Это говорит о том, что метод LPR применим для оценки вклада коррозии в коррозионно-эрозионных испытаниях.

Коэффициент при уравнении для эрозионных испытаний кратно отличается от других типов экспериментов (0,005). Коррозионная составляющая, а также интенсивность роста скорости коррозии в данных испытаниях крайне малы.

Полученные данные о кинетике скорости коррозии позволят точнее рассчитывать срок эксплуатации материалов в реальных условиях, в том числе и при воздействии эрозионного фактора.

Таким образом, разработанная методика измерений показала положительный результат в изучении синергизма. Результаты исследования можно использовать в сфере мониторинга деградации нефтегазовых трубопроводов.

Заключение и выводы

В рамках исследования разработаны и усовершенствованы методика и оборудование для проведения коррозионно-эрозионных испытаний гравиметрическим и электрохимическим методами.

Полученные результаты подтвердили наличие синергизма и его численное значение (2,8671 мм/год). Влияние синергетической и аддитивной составляющих коррозионно-эрозионного процесса равны. Оценен вклад коррозионного, эрозионного и коррозионно-эрозионного факторов в общую деградацию материала. Доля синергии – 60%, эрозии – 27%, коррозии – 13%.

Проведен анализ кинетики скоростей коррозии при коррозионно-эрозионном воздействии. Кинетика роста скорости коррозии при коррозионных и коррозионно-эрозионных испытаниях схожи, о чем свидетельствуют коэффициенты в уравнениях. Кинетика роста скорости коррозии эрозионных испытаний значительно ниже. Это свидетельствует о том, что метод LPR позволяет определить вклад коррозии в коррозионно-эрозионный процесс.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Popoola L.T., Grema A.S., Latinwo G.K., Gutti B., Balogun A.S.** Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation, *International Journal of Industrial Chemistry*, 4 (2013) 35. DOI: 10.1186/2228-5547-4-35

[2] **Kermani B., Martin J., Esaklul K.** Materials design strategy: Effects of H₂S/CO₂ corrosion on materials selection, *CORROSION NACE Expo 2006: 61st Annual Conference & Exposition*, (2006) 06121.

[3] **Fonseca D., Tagliari M.R., Guaglianoni W.C., Tamborim S.M., Borges M.F.** Carbon dioxide corrosion mechanisms: Historical development and key parameters of CO₂-H₂O systems, *International Journal of Corrosion*, (2024) 5537767. DOI: 10.1155/2024/5537767

[4] **Рябов А.А., Кудрявцев А.Ю., Воронков О.В., Меньшиков С.Н., Мельников И.В., Харитонов А.Н., Киселев М.Н., Архипов Ю.А.** Численные исследования эрозии и прочности элементов газопроводов // Проблемы прочности и пластичности. 2015. Т. 77, № 3. С. 253–265.

[5] **Abduljabbar A., Mohyaldinn M.E., Younis O., Alghurabi A., Alakbari F.S.** Erosion of sand screens by solid particles: a review of experimental investigations, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12 (2022) 2329–2345. DOI: 10.1007/s13202-022-01467-4

[6] **Rajkumar Y., Shirazi S.A., Karimi S.** Effect of pipe size on erosion measurements and predictions in liquid-dominated multiphase flows for the elbows, *Wear*, 523 (2023) 204797. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204797

[7] **Адаменков А.К., Веселова И.Н.** Моделирование эрозионно-коррозионного износа трубопроводов и мониторинг его развития на основе магнитоанизотропного метода // Глобальная ядерная безопасность. 2021. Т. 40, № 3. С. 68–74. DOI: 10.26583/gns-2021-03-07

[8] **Томаров Г.В., Шпиков А.А.** Влияние массообмена и физико-химических процессов в рабочей среде на эрозию-коррозию оборудования и трубопроводов атомных электростанций // Атомная энергия. 2021. Т. 130, № 5. С. 262–269.

[9] **Бараненко В.И., Гулина О.М., Сальников Н.Л., Мурзина О.Э.** Обоснование расчетов скорости эрозионно-коррозионного износа и остаточного ресурса трубопроводов АЭС по данным эксплуатационного контроля // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2016. № 2. С. 55–65. DOI: 10.26583/npe.2016.2.06

[10] **Xu Y., Zhang Q., Chen H., Huang Y.** Understanding the interaction between erosion and corrosion of pipeline steel in acid solution of different pH, *Journal of Materials Research and Technology*, 25 (2023) 6550–6566. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.109

[11] **Wang Z.B., Zheng Y.G.** Critical flow velocity phenomenon in erosion-corrosion of pipelines: Determination methods, mechanisms and applications, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 1 (1) (2021) 63–73. DOI: 10.1016/j.jpse.2021.01.005

[12] **Toor I.U., Alashwan Z., Badr H.M., Ben-Mansour R., Shirazi S.A.** Effect of jet impingement velocity and angle on CO₂ erosion–corrosion with and without sand for API 5L-X65 carbon steel, *Materials*, 13 (9) (2020) 2198. DOI: 10.3390/ma13092198

[13] **Wang W., Hu J., Yuan X., Zhou L., Yu J., Zhang Z., Zhong X.** Understanding the effect of tensile stress on erosion-corrosion of X70 pipeline steel, *Construction and Building Materials*, 342 (B) (2022) 127972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127972

[14] **Okonkwo P.C., Mohamed A.M.A.** Erosion-corrosion in oil and gas industry: A review, *International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering (IJMMSE)*, 4 (3) (2014) 7–28.

[15] **Sekar A., Bennet A.R.** A comprehensive review on synergistic and individual effects of erosion–corrosion in ferrous piping materials, *Corrosion Reviews*, 41 (4) (2023) 399–416. DOI: 10.1515/corr-rev-2022-0063

[16] **Rao P., Mulky L.** Erosion-corrosion of materials in industrial equipment: A review, *ChemElectroChem*, 10 (16) (2023) e202300152. DOI: 10.1002/celec.202300152

[17] **Postlethwaite J.** Effect of chromate inhibitor on the mechanical and electrochemical components of erosion-corrosion in aqueous slurries of sand, *Corrosion*, 37 (1) (1981) 1–5. DOI: 10.5006/1.3593833

[18] **Neville A., Reyes M., Xu H.** Examining corrosion effects and corrosion/erosion interactions on metallic materials in aqueous slurries, *Tribology International*, 35 (10) (2002) 643–650. DOI: 10.1016/S0301-679X(02)00055-5

[19] **Логиновских В.М., Заворина А.С., Павлов В.П., Воробьев И.В.** Изучение темпов эрозионного износа газопроводов // Нефтяная провинция. 2019. Т. 20, № 4. С. 339–351. DOI: 10.25689/NP.2019.4.339-351

[20] **Toor I.U., Irshad H.M., Badr H.M., Samad M.A.** The effect of impingement velocity and angle variation on the erosion corrosion performance of API 5L-X65 carbon steel in a flow loop, *Metals*, 8 (6) (2018) 402. DOI: 10.3390/met8060402

[21] **Голубев И.А., Шапошников Н.О., Лаптев А.Б., Крук П.Е., Попков А.С., Игошин Р.В.** Моделирование процессов коррозионно-эрозионного износа трубопроводов транспорта газо-жидкостных потоков. Проточные установки с подачей струи на образец // Наука и техника в газовой промышленности. 2024. Т. 100, № 4. – С. 54–63.

[22] **Голубев И.А., Лаптев А.Б., Альхименко А.А., Демьянов Г.В., Жуков Н.В., Калининский А.А., Онацкий В.Л.** Моделирование процессов коррозионно-эрозионного износа трубопроводов транспорта газо-жидкостных потоков. Автоклавные установки с вращающимися частями // Наука и техника в газовой промышленности. 2024. Т. 99, № 3. С. 66–73.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЕМЬЯНОВ Григорий Владимирович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: demyanov.g@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5236-5594>

ГЛЕБОВА Екатерина Юрьевна – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: ekaterina_glebova_2013@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1736-9770>

ГОЛУБЕВ Иван Андреевич – ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: golubev2m@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7516-3566>

АЛЬХИМЕНКО Алексей Александрович – директор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6701-1765>

КРУК Павел Евгеньевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: krukpavele@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2546-5763>

REFERENCES

- [1] L.T. Popoola, A.S. Grema, G.K. Latinwo, B. Gutti, A.S. Balogun, Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation, *International Journal of Industrial Chemistry*, 4 (2013) 35. DOI: 10.1186/2228-5547-4-35
- [2] B. Kermani, J. Martin, K. Esaklul, Materials design strategy: Effects of H₂S/CO₂ corrosion on materials selection, *CORROSION NACE* Expo 2006: 61st Annual Conference & Exposition, (2006) 06121.
- [3] D. Fonseca, M.R. Tagliari, W.C. Guaglianoni, S.M. Tamborim, vBorges, Carbon dioxide corrosion mechanisms: Historical development and key parameters of CO₂-H₂O systems, *International Journal of Corrosion*, (2024) 5537767. DOI: 10.1155/2024/5537767
- [4] A.A. Ryabov, A.Yu. Kudryavtsev, O.V. Voronkov, S.N. Menshikov, I.V. Melnikov, A.N. Haritonov, M.N. Kiselev, Yu.A. Arkhipov, Numerically investigating erosion and strength of structural elements of gas pipelines, *Problems of Strength and Plasticity*, 77 (3) (2015) 253–265.
- [5] A. Abduljabbar, M.E. Mohyaldinn, O. Younis, A. Alghurabi, F.S. Alakbari, Erosion of sand screens by solid particles: a review of experimental investigations, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12 (2022) 2329–2345. DOI: 10.1007/s13202-022-01467-4
- [6] Y. Rajkumar, S.A. Shirazi, S. Karimi, Effect of pipe size on erosion measurements and predictions in liquid-dominated multiphase flows for the elbows, *Wear*, 523 (2023) 204797. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204797
- [7] A.K. Adamenkov, I.N. Veselova, Modeling of erosion-corrosion wear of pipelines and monitoring of its development based on magnetic anisotropic method, *Nuclear Safety*, 3 (2021) 68–74. DOI: 10.26583/gns-2021-03-07

- [8] **G.V. Tomarov, A.A. Shipkov**, Influence of mass transfer and physicochemical processes in the working fluid on erosion–corrosion of equipment and pipelines in nuclear power plants, *Atomic Energy*, 130 (5) (2021) 278–284. DOI: 10.1007/s10512-021-00809-5
- [9] **V.I. Baranenko, O.M. Gulina, N.L. Salnikov, O.E. Murzina**, Substantiation of fac rate and service life estimation under operation control data, *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2 (2016) 55–65. DOI: 10.26583/npe.2016.2.06
- [10] **Y. Xu, Q. Zhang, H. Chen, Y. Huang**, Understanding the interaction between erosion and corrosion of pipeline steel in acid solution of different pH, *Journal of Materials Research and Technology*, 25 (2023) 6550–6566. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.109
- [11] **Z.B. Wang, Y.G. Zheng**, Critical flow velocity phenomenon in erosion-corrosion of pipelines: Determination methods, mechanisms and applications, *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 1 (1) (2021) 63–73. DOI: 10.1016/j.jpse.2021.01.005
- [12] **I.U. Toor, Z. Alashwan, H.M. Badr, R. Ben-Mansour, S.A. Shirazi**, Effect of jet impingement velocity and angle on CO₂ erosion–corrosion with and without sand for API 5L-X65 carbon steel, *Materials*, 13 (9) (2020) 2198. DOI: 10.3390/ma13092198
- [13] **W. Wang, J. Hu, X. Yuan, L. Zhou, J. Yu, Z. Zhang, X. Zhong**, Understanding the effect of tensile stress on erosion-corrosion of X70 pipeline steel, *Construction and Building Materials*, 342 (B) (2022) 127972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127972
- [14] **P.C. Okonkwo, A.M.A. Mohamed**, Erosion-corrosion in oil and gas industry: A review, *International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering (IJMMSE)*, 4 (3) (2014) 7–28.
- [15] **A. Sekar, A.R. Bennet**, A comprehensive review on synergistic and individual effects of erosion–corrosion in ferrous piping materials, *Corrosion Reviews*, 41 (4) (2023) 399–416. DOI: 10.1515/corr-rev-2022-0063
- [16] **P. Rao, L. Mulky**, Erosion-corrosion of materials in industrial equipment: A review, *ChemElectroChem*, 10 (16) (2023) e202300152. DOI: 10.1002/celec.202300152
- [17] **J. Postlethwaite**, Effect of chromate inhibitor on the mechanical and electrochemical components of erosion–corrosion in aqueous slurries of sand, *Corrosion*, 37 (1) (1981) 1–5. DOI: 10.5006/1.3593833
- [18] **A. Neville, M. Reyes, H. Xu**, Examining corrosion effects and corrosion/erosion interactions on metallic materials in aqueous slurries, *Tribology International*, 35 (10) (2002) 643–650. DOI: 10.1016/S0301-679X(02)00055-5
- [19] **V.M. Loginovskikh, A.S. Zavorina, V.P. Pavlov, I.V. Borobyev**, Study of erosive wear rates, *Neftyanaya Provintsiya*, 20 (4) (2019) 339–351. DOI: 10.25689/NP.2019.4.339-351
- [20] **I.U. Toor, H.M. Irshad, H.M. Badr, M.A. Samad**, The effect of impingement velocity and angle variation on the erosion corrosion performance of API 5L-X65 carbon steel in a flow loop, *Metals*, 8 (6) (2018) 402. DOI: 10.3390/met8060402
- [21] **I.A. Golubev, N.O. Shaposhnikov, A.B. Laptev, P.E. Kruk, A.S. Popkov, R.V. Igoshin**, Modelirovanie protsessov korrozionno-erozionnogo iznosa truboprovodov transporta gazozhidkostnykh potokov. Protochnye ustanovki s podachei strui na obrazets [Modeling of corrosion and erosion wear processes in gas-liquid pipelines. Flow-through setups with jet feed to the sample], *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti [Science and technology in the gas industry]*, 100 (4) (2024) 54–63.
- [22] **I.A. Golubev, A.B. Laptev, A.A. Al'khimenko, G.V. Dem'ianov, N.V. Zhukov, A.A. Kalininskii, V.L. Onatskii**, Modelirovanie protsessov korrozionno-erozionnogo iznosa truboprovodov transporta gazozhidkostnykh potokov. Avtoklavnye ustanovki s vrashchaiushchimisya chastiami [Modeling of corrosion and erosion wear processes in gas-liquid pipelines. Autoclave units with rotating parts], *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti [Science and technology in the gas industry]*, 99 (3) (2024) 66–73.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Gregory V. DEMYANOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: demyanov.g@bk.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5236-5594>

Ekaterina Y. GLEBOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: ekaterina_glebova_2013@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1736-9770>

Ivan A. GOLUBEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: golubev2m@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7516-3566>

Alexey A. ALKHIMENKO – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: a.alkhimenko@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6701-1765>

Pavel E. KRUK – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: krukpavele@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2546-5763>

Поступила: 29.07.2025; Одобрена: 15.10.2025; Принята: 27.10.2025.
Submitted: 29.07.2025; Approved: 15.10.2025; Accepted: 27.10.2025.

Научная статья

УДК 691-405

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31408>



С.В. Ганин, С.А. Блинов, А.М. Левитский ✉

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

✉ levitskij_am@spbstu.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВСПЕНИВАНИЯ НА ХАРАКТЕР ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПЕНОАЛЮМИНИЯ

Аннотация. Изучено влияние технологии вспенивания на характер пористой структуры деформированных заготовок из пеноалюминия. Заготовки производили по порошковой технологии. Процесс изготовления включал в себя такие технологические операции, как смешивание шихты, холодная прессовка в закрытой матрице, горячая экструзия и горячая прокатка. В результате получали прутки с квадратным сечением 2,5×2,5 мм. Вспенивание полученных заготовок осуществляли тремя способами: в процессе наплавки методом TIG, прямым пропусканием тока и при помощи газовой горелки. После вспенивания была изучена структура образцов. Установлено, что наиболее однородная пористая структура заготовок формируется при нагреве прямым пропусканием тока, однако этот способ технологически наиболее сложный. Более практичным и простым является нагрев газовой горелкой.

Ключевые слова: алюминий, пенометалл, наплавка, процесс вспенивания, пенообразующий агент.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка методов компьютерного моделирования процессов вспенивания порошковых материалов системы алюминий-гидрид титана с использованием физического моделирования процесса вспенивания» (Соглашение №24-29-00795, <https://rscf.ru/project/24-29-00795/>).

Для цитирования:

Ганин С.В., Блинов С.А., Левитский А.М. Влияние технологии вспенивания на характер пористой структуры деформированных заготовок из пеноалюминия // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 105–117. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31408>



S.V. Ganin, S.A. Blinov, A.M. Levitsky ✉

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

✉ levitskij_am@spbstu.ru

EFFECT OF FOAMING TECHNOLOGY ON THE POROUS STRUCTURE OF DEFORMED FOAM ALUMINUM BLANKS

Abstract. The effect of foaming technology on the porous structure of deformed aluminum foam blanks was studied. The blanks were produced using powder technology. The manufacturing process included batch mixing, cold pressing in a closed die, hot extrusion and hot rolling. The resulting rods had a square cross-section of 2.5×2.5 mm. Foaming of the resulting blanks was achieved using three methods: TIG welding, direct current flow and a gas torch. After foaming, the structure of the samples was studied. It was found that the most uniform porous structure of the blanks was formed by heating by direct current flow; however, this method is technologically more complex. Heating with a gas torch is more practical and simpler.

Keywords: aluminium, foam metal, fusion, foaming process, foam-forming agent.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-29-00795 “Development of methods for computer modeling of foaming processes of powder materials of the aluminum-titanium hydride system using physical modeling of the foaming process”. Available online: <https://rscf.ru/project/24-29-00795/>.

Citation:

Ganin S.V., Blinov S.A., Levitsky A.M., Effect of foaming technology on the porous structure of deformed foam aluminum blanks, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 105–117, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31408>

Введение. Металлические пены известны достаточно давно [1], однако до настоящего времени они не получили широкого промышленного применения. Пены были предложены в различных отраслях, включая автомобилестроение, судостроение, железнодорожный транспорт, авиацию, гражданское строительство и военное дело [2–7]. В настоящее время основное внимание уделяется структурам с закрытыми порами (губкам), поскольку они в основном используются в качестве функциональных материалов, например для изготовления фильтров, катализаторов, электродов, в медицине [3, 7] и реже – как конструкционные материалы. Преимущества металлической пены по сравнению с традиционными материалами заключаются в способности к относительно эффективной тепло- и звукоизоляции, а также в возможности эффективно поглощать энергию от ударной нагрузки при малой массе [8, 9].

Существуют различные методы получения металлических пен. Метод порошковой металлургии – наиболее распространенный промышленный метод производства пенометаллов с закрытыми порами. Процесс включает смешивание металлического порошка с порообразователем, прессование смеси в компактные газонепроницаемые заготовки, нагрев заготовок до температуры плавления металла, разложение порообразователя и выделение газа, вызывающее вспенивание материала, охлаждение и стабилизацию полученной пенной структуры.

Литейные методы предполагают непосредственное вспенивание расплавленного металла за счет добавления вспенивателя в расплав или за счет продувки расплава инертным газом [10, 11].

Цель работы состоит в изучении пористой структуры металлических пен, полученных методом порошковой металлургии [11, 12].

Ход эксперимента

Для исследования использовали порошок силуминового сплава марки АК 12, фракцией 120–310 мкм. Химический состав порошка приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав порошка АК 12

Table 1

Chemical composition of AK 12 powder

Содержание элементов, масс. %				
Al	Si	Fe	Mn	Ti
87,9	11,5	0,3	0,2	0,1

Для создания пенометалла из алюминиевого порошка был использован гидрид титана (TiH_2) – порошок серого цвета, молярная масса которого равна 49,915 г/моль, а плотность составляет 3,76 г/см³. При температуре 400–470°C происходят разложение и выделение водорода [12–15]. Выбор этого материала обоснован относительно небольшой стоимостью, а также наибольшим удельным содержанием газа среди других вариантов вспенивателей.

Методика получения пеноалюминия включала три этапа:

- 1) смешивание шихты;
- 2) горячая экструзия;
- 3) прокатка.

Для получения однородной смеси порошков АК 12 и гидрида титана использовалась планетарная мельница Pulverisette 7 Premium Line (рис. 1).

Общая продолжительность обработки смеси в планетарной мельнице равнялась трем часам при скорости вращения 500 об/мин. В качестве мелющих тел использовали шарики диаметром 10 мм. Процесс смешивания проходил в два этапа: сначала в течение одного часа в изопропиловом спирте, затем в течение двух часов с добавлением флюса в инертной атмосфере.



Рис. 1. Планетарная мельница Pulverisette 7 Premium Line

Fig. 1. Planetary mill Pulverisette 7 Premium Line

Для получения заготовки из порошковой смеси АК 12 + TiN₂ была применена горячая экструзия. Изготавливали вытянутые металлические заготовки с постоянным поперечным сечением. Экструзия проводилась на прессе (рис. 2) с использованием специальной оснастки (рис. 3).

Процесс экструзии проводили в два этапа:

- 1) подготовка цилиндрических образцов;
- 2) подготовка оснастки: капсула с образцом, фильеры, пресс-шайба, пуансон.

Для экструзии изготовили капсулы из прутка алюминиевого сплава АМг5 (ГОСТ 4784-97). Они имеют следующие размеры: диаметр – 28,5 мм, высота – 60 мм, толщина стенки – 2 мм, толщина дна – 3 мм (рис. 4а).

Эмпирическим способом определили, что плотность порошковой прессовки играет значительную роль при экструдировании. Низкие значения начальной плотности приводят к значительной остаточной пористости в прутке. Исходя из этого, была добавлена операция брикетирования методом холодного прессования в закрытой матрице. Фотография капсулы с брикетом представлена на рис. 4б. Для снижения трения применяли графит.



Рис. 2. Гидравлический пресс ПСУ-125 с оснасткой для горячей экструзии
Fig. 2. PSU-125 hydraulic press with hot extrusion tooling

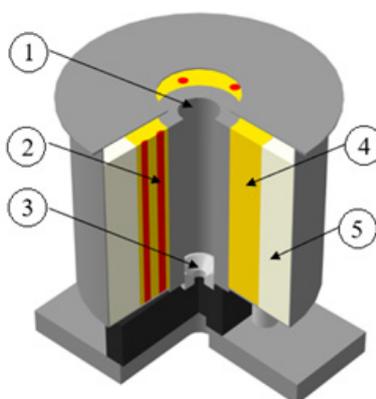


Рис. 3. 3D-модель оснастки для горячей экструзии: 1) рабочее отверстие; 2) нагревательный элемент; 3) фильера; 4) тепловая изоляция; 5) футеровка

Fig. 3. 3D model of hot extrusion tooling: 1) working opening; 2) heating element; 3) die; 4) thermal insulation; 5) lining



Рис. 4. Внешний вид капсулы (а) и капсулы с порошковой прессовкой для горячей экструзии (б)
 Fig. 4. The appearance of the capsule (a) and powder-pressed capsule for hot extrusion (b)



Рис. 5. Внешний вид экструдированных прутков
 Fig. 5. Appearance of the extruded rods

Оснастка с заготовкой выдерживались на протяжении 20 минут при температуре 400–430°C. Скорость перемещения пуансона задавалась в интервале от 0,35 до 0,5 мм/с.

В результате получили прутки диаметром 10 мм и длиной 340–380 мм. Визуальный анализ показал отсутствие дефектов на оболочке. Ввиду особенностей напряженно-деформированного состояния материала в процессе экструзии на краях прутков наблюдается большое количество дефектов. В связи с этим после правки эти части отрезались (рис. 5).

Финальным этапом при подготовке пенометалла была горячая пластическая деформация, заключающаяся в прокатке экструдированных заготовок. Проведение данной операции способствовало повышению комплекса механических свойств за счет разбивания конгломерации частиц упрочнителя и снижения уровня остаточной пористости. Кроме того, прокатка позволила получить требуемые геометрические параметры прутков для последующих исследований. Перед прокаткой прутки были подвергнуты предварительному нагреву до температуры 400–450°C. В результате прокатки на стане 100 (рис. 6) получали квадратные прутки со стороной 2,5 мм. Общий вид заготовок представлен на рис. 7.

Полученные прутки АК 12 + TiH₂ требуемого размера подвергали нагреву, используя три различных метода для образования пор внутри материала.

Первым вариантом нагрева была выбрана сварка неплавящимся электродом в среде инертного газа (TIG) с использованием полученного прутка в качестве присадочного материала для наплавки. Нагрев проводили с использованием установки ручной TIG-сварки (рис. 8). Аргон



Рис. 6. Стан 100 для горячей прокатки в калибрах
Fig. 6. Mill 100 for hot rolling in calibers

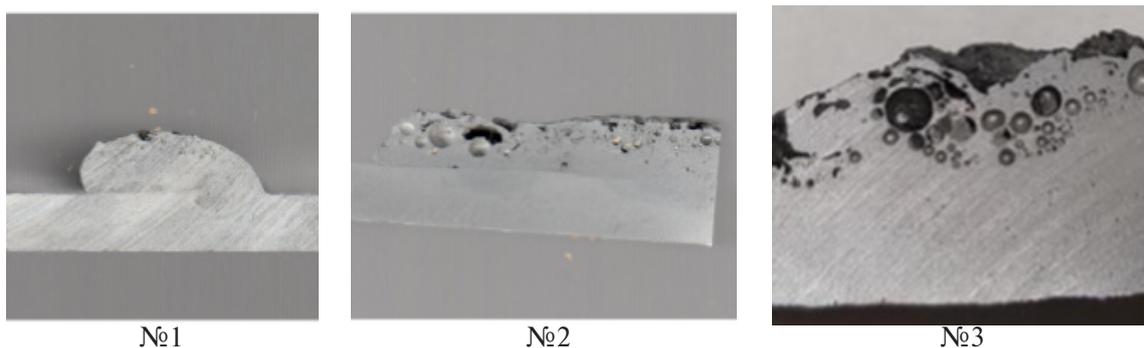


Рис. 7. Прутки после горячей прокатки в калибрах с различной вытяжкой
Fig. 7. Bars after hot rolling in calibers with different extrusion



Рис. 8. Установка ручной TIG-сварки
Fig. 8. Manual TIG welding setup

подавался непосредственно в зону дуги, которая находилась между неплавящимся вольфрамовым электродом и алюминиевой подложкой. Газ необходим для защиты материала от окисления во время нагрева. Для подготовки прутка к наплавке его обезжировали с помощью растворителя. После этого на три пластины по различным режимам были наплавлены валики (рис. 9).



№1

№2

№3

Рис. 9. Фотографии образцов после нагрева методом TIG

Fig. 9. Photos of samples after TIG heating



Рис. 10. Испытательный комплекс Gleeble-3800

Fig. 10. Gleeble-3800 testing complex

По результатам этого эксперимента установлено следующее:

1) Высокая температура внутри дуги привела к изменениям в структуре образцов, а именно – большая часть пор образовалась на поверхности образца. Это вызвано перегревом расплава, что повысило жидкотекучесть и позволило пузырькам водорода с большей скоростью и за меньшее время подняться на поверхность. Кроме того, температура дуги позволила расплавить не только алюминий, но и его оксиды, что также упростило выход пузырьков на поверхность.

2) Образец № 1 имеет неравномерную пористую структуру, поры небольшого размера, находящиеся на разном расстоянии друг от друга (рис. 9). Валик сформировался однородным, а из этого следует, что использованный режим не позволяет достигнуть необходимого результата.

3) В образце № 2 (рис. 9) структура пористая. Основное количество пор образовалось в верхних и средних частях образца, а в нижней части наплавки поры практически отсутствуют. Пory имеют различные диаметры, большие сосредоточены в верхней части шва, остальное пространство металла заполнено маленькими порами. Таким образом, однородной пористой структуры материала также не получено.

4) В структуре образца № 3 (рис. 9) наблюдается более упорядоченное расположение пор. Они в равной степени распределены по объему наплавки, однако размер их существенно различается.

Для второго варианта нагрева использовали испытательный комплекс Gleeble-3800 (рис. 10). Нагрев в этом случае осуществляли за счет прямого пропускания тока. Подобный метод нагрева позволяет варьировать скорость нагрева в большом диапазоне.

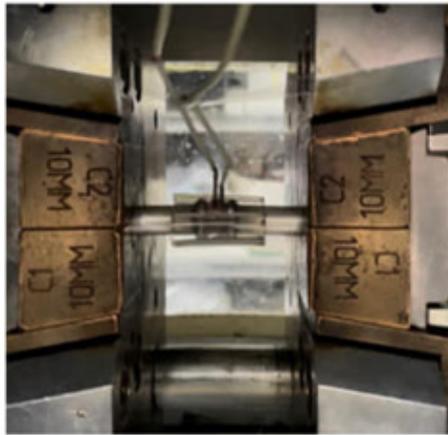


Рис. 11. Вид образца в комплексе Gleeble-3800
Fig. 11. View of sample in the Gleeble-3800 complex

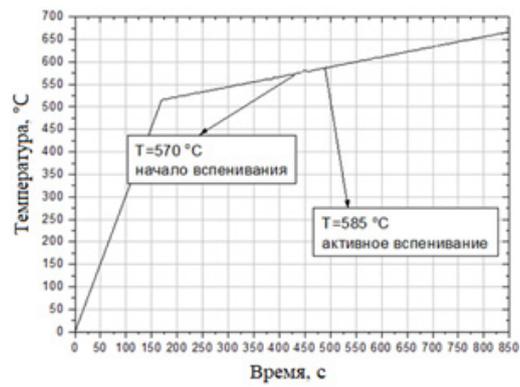


Рис. 12. Зависимость температуры от времени с указанием стадий вспенивания
Fig. 12. Temperature versus time dependence with indication of foaming stages



Рис. 13. Структура образца № 4 после нагрева в установке Gleeble-3800
Fig. 13. Structure of sample No. 4 after heating in the Gleeble-3800 complex



Рис. 14. Газовый набор

Fig. 14. Gas kit



Рис. 15. Процесс вспенивания с помощью газовой горелки

Fig. 15. Foaming with a gas burner

Выполнение эксперимента на комплексе Gleeble-3800 требует определенной формы образца, поэтому образцы после экструзии не подвергали прокатке в квадратных калибрах. Для контроля температуры к образцу приваривали термпары (рис. 11). Скорость нагрева образцов составляла 3 °С/сек до достижения 525°С и 0.2 °С/сек до достижения 660°С. Благодаря низкой скорости нагрева при визуальном контроле образца во время эксперимента можно было выделить стадии вспенивания (рис. 12).

Анализ структуры полученного образца № 4 (рис. 13) свидетельствует, что он имеет практически однородную пористую структуру. Поры маленького размера расположены по всему объему образца. Ближе к центру размер пор незначительно увеличивается.

Для третьего способа нагрева использовали газовый набор, состоящий из горелки Armero и баллона А710/115 (рис. 14). Процесс вспенивания показан на рис. 15.

Структура полученного материала – образец № 5 (рис. 16) – наиболее пористая из всех исследованных. При этом размер пор в разных частях образца значительно различается. В верхней части прутка присутствуют поры большего диаметра.

Заключение

Результаты исследования влияния способа нагрева при вспенивании пеноалюминия марки АК 12 позволяют заключить следующее:

1) Вспенивание при помощи горелки ТIG не позволяет получить равномерную пористую структуру материала. Ввиду того, что температура дуги достигает нескольких тысяч градусов,



Рис. 16. Структура образца № 5

Fig. 16. Structure of sample No. 5

происходит полное расплавление металла, и пузыри водорода всплывают на его поверхность. Как следствие, в верхней части образца образуются поры большого размера, а оставшаяся часть материала заполнена очень маленькими порами.

2) Нагрев прямым пропусканием тока позволил получить равномерное распределение пор по всему объему образца, однако поры в центре имеют более крупный размер, чем в остальной части заготовки. Следует также отметить, что реализация этого метода вспенивания достаточно сложная, что является его недостатком.

3) Использование газовой горелки для вспенивания заготовки обеспечивает ее равномерный нагрев и позволяет контролировать место локального нагрева. После вспенивания материал имеет выраженную пористую структуру. Однако диаметр пор в верхней части заготовки несколько больше, чем в средней и нижней.

Таким образом, наиболее однородная и равномерная пористая структура алюминиевого пенометалла формируется при нагреве заготовки прямым пропусканием тока, однако этот метод технологически наиболее сложный. По этой причине для промышленного использования можно рекомендовать нагрев газовой горелкой как наиболее технологичный и простой, а также обеспечивающий получение достаточно однородной структуры материала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Banhart J.** Light-metal foams – history of innovation and technological challenges, *Advanced Engineering Materials*, 15 (3) (2013) 82–111. DOI: 10.1002/adem.201200217
- [2] **Salins S.S., Kumar S., Shetty S., Sachidananda H.K., Khan M.S.A.** Characterization of the aluminum-based metal foam properties for automotive applications, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50 (2025) 9247–9260. DOI: 10.1007/s13369-024-09399-3
- [3] **Pratomo A.N., Santosa S.P., Gunawan L., Widagdo D., Putra I.S.** Design optimization and structural integrity simulation of aluminum foam sandwich construction for armored vehicle protection, *Composite Structures*, 276 (2021) 114461. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114461
- [4] **Lefebvre L.-P., Banhart J., Dunand D.C.** Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments, *Advanced Engineering Materials*, 10 (9) (2008) 775–787. DOI: 10.1002/adem.200800241
- [5] **Qin Junhua, Chen Qing, Yang Chunyan, Huang Yong.** Research process on property and application of metal porous, *Journal of Alloys and Compounds*, 654 (2016) 39–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.09.148
- [6] **Baumeister J., Weise J., Hirtz E., Höhne K., Hohe J.** Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles, *Materials Science & Engineering Technology*, 45 (12) (2014) 1099–1107. DOI: 10.1002/mawe.201400358

- [7] **Kim S., Lee C.-W.** A review on manufacturing and application of open-cell metal foam, *Procedia Materials Science*, 4 (2014) 305–309. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.562
- [8] **Banhart J., García-Moreno F., Heim K., Seeliger H.-W.** Light-weighting in transportation and defence using aluminium foam sandwich structures, in: *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation* (eds. A. Gokhale, A. Prasad, N. Basu), (2019) 61–72. DOI: 10.1007/978-981-15-1263-6_5
- [9] **Yuan Jian, Liu Kun, Gao Cheng-Qiang, You Zhi-Yue, Kang Shao-Bo.** Experimental and numerical studies on corrosion-resistant aluminium foam sandwich panel subject to low-velocity impact, *Scientific Reports*, 14 (2024) 26611. DOI: 10.1038/s41598-024-78178-9
- [10] **Fu Wensheng, Li Yanxiang.** Air blowing assisted fabrication of Al–Si–Mg foams by melt-foaming route, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 56 (2025) 3886–3897. DOI: 10.1007/s11663-025-03612-w
- [11] **Fu Wensheng, Li Yanxiang.** Fabrication, processing, properties, and applications of closed-cell aluminium foams: A review, *Materials*, 17 (3) (2024) 560. DOI: 10.3390/ma17030560
- [12] **Banhart J.** Metal foams: Production and stability, *Advanced Engineering Materials*, 8 (9) (2006) 781–794. DOI: 10.1002/adem.200600071
- [13] **Liu Ru-Shi, Zhang Lei, Sun Xueliang, Liu Hansan, Zhang JiuJun.** Electrochemical technologies for energy storage and conversion, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. DOI: 10.1002/9783527639496
- [14] **Alizadeh E., Mashtizadeh A.R., Azizieh M.** Influence of titanium hydride heat treatment time on pore morphology of friction stir welded aluminum nanocomposite foams. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 78 (2025) 254. DOI: 10.1007/s12666-025-03654-3
- [15] **Korosteleva N.D., Ganin S.V., Kondrat'ev S.Yu.** Study of the effect of process parameters on the foaming temperature of foam aluminum, *Metal Science and Heat Treatment*, 66 (2025) 797–802. DOI: 10.1007/s11041-025-01119-4

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАНИН Сергей Владимирович – директор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: ganin_sv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2307-9319>

БЛИНОВ Святослав Алексеевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

REFERENCES

- [1] **J. Banhart,** Light-metal foams – history of innovation and technological challenges, *Advanced Engineering Materials*, 15 (3) (2013) 82–111. DOI: 10.1002/adem.201200217

- [2] **S.S. Salins, S. Kumar, S. Shetty, H.K. Sachidananda, M.S.A.Khan**, Characterization of the aluminum-based metal foam properties for automotive applications, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50 (2025) 9247–9260. DOI: 10.1007/s13369-024-09399-3
- [3] **A.N. Pratomo, S.P. Santosa, L. Gunawan, D. Widagdo, I.S. Putra**, Design optimization and structural integrity simulation of aluminum foam sandwich construction for armored vehicle protection, *Composite Structures*, 276 (2021) 114461. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114461
- [4] **L.-P. Lefebvre, J. Banhart, D. C. Dunand**, Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments, *Advanced Engineering Materials*, 10 (9) (2008) 775–787. DOI: 10.1002/adem.200800241
- [5] **Qin Junhua, Chen Qing, Yang Chunyan, Huang Yong**, Research process on property and application of metal porous, *Journal of Alloys and Compounds*, 654 (2016) 39–44. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.09.148
- [6] **J. Baumeister, J. Weise, E. Hirtz, K. Höhne, J. Hohe**, Applications of aluminum hybrid foam sandwiches in battery housings for electric vehicles, *Materials Science & Engineering Technology*, 45 (12) (2014) 1099–1107. DOI: 10.1002/mawe.201400358
- [7] **S. Kim, C.-W. Lee**, A review on manufacturing and application of open-cell metal foam, *Procedia Materials Science*, 4 (2014) 305–309. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.562
- [8] **J. Banhart, F. García-Moreno, K. Heim, H.-W. Seeliger**, Light-weighting in transportation and defence using aluminium foam sandwich structures, in: *Light Weighting for Defense, Aerospace, and Transportation* (eds. A. Gokhale, A. Prasad, N. Basu), (2019) 61–72. DOI: 10.1007/978-981-15-1263-6_5
- [9] **Yuan Jian, Liu Kun, Gao Cheng-Qiang, You Zhi-Yue, Kang Shao-Bo**, Experimental and numerical studies on corrosion-resistant aluminium foam sandwich panel subject to low-velocity impact, *Scientific Reports*, 14 (2024) 26611. DOI: 10.1038/s41598-024-78178-9
- [10] **Fu Wensheng, Li Yanxiang**, Air blowing assisted fabrication of Al–Si–Mg foams by melt-foaming route, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 56 (2025) 3886–3897. DOI: 10.1007/s11663-025-03612-w
- [11] **Fu Wensheng, Li Yanxiang**, Fabrication, processing, properties, and applications of closed-cell aluminum foams: A review, *Materials*, 17 (3) (2024) 560. DOI: 10.3390/ma17030560
- [12] **J. Banhart**, Metal foams: Production and stability, *Advanced Engineering Materials*, 8 (9) (2006) 781–794. DOI: 10.1002/adem.200600071
- [13] **Liu Ru-Shi, Zhang Lei, Sun Xueliang, Liu Hansan, Zhang JiuJun**, *Electrochemical technologies for energy storage and conversion*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. DOI: 10.1002/9783527639496
- [14] **E. Alizadeh, A.R. Mashtizadeh, M. Azizieh**, Influence of titanium hydride heat treatment time on pore morphology of friction stir welded aluminum nanocomposite foams. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 78 (2025) 254. DOI: 10.1007/s12666-025-03654-3
- [15] **N.D. Korosteleva, S.V. Ganin, S.Yu. Kondrat'ev**, Study of the effect of process parameters on the foaming temperature of foam aluminum, *Metal Science and Heat Treatment*, 66 (2025) 797–802. DOI: 10.1007/s11041-025-01119-4

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergei V. GANIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ganin_sv@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2307-9319>

Sviatoslav A. BLINOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

Alexey M. LEVITSKY – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

Поступила: 06.11.2025; Одобрена: 05.12.2025; Принята: 05.12.2025.

Submitted: 06.11.2025; Approved: 05.12.2025; Accepted: 05.12.2025.

Научная статья

УДК 620.193

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>



А.И. Попов¹ ✉, В.Г. Теплухин¹,
М.М. Радкевич¹, С.В. Беляков², И.И. Власов³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

² Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия;

³ НИЦ «Курчатовский Институт» – ФГУП Всероссийский научно-исследовательский
институт авиационных материалов, Москва, Россия

✉ popov_ai@spbstu.ru

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОПОВЕРХНОСТЕЙ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ ЗА СЧЕТ СТРУЙНОЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Работа направлена на изучение коррозионных свойств нержавеющей стали после снижения параметра шероховатости Ra поверхности струйной электролитно-плазменной обработкой. Исследования проводились с помощью электронной и атомно-силовой микроскопии и стандартных испытаний коррозионных характеристик. В процессе исследования изучали снижение параметра шероховатости Ra и морфология поверхности образцов для нержавеющей стали 20X13, 08X18H9T, AISI 304, AISI 310, AISI 316L, а также для никелевого жаропрочного сплава ЭП648. Исходная поверхность образцов была получена методом прокатки, пилением механической ножовкой, технологией SLM и технологией струйной электролитно-плазменной обработки. Впервые показана возможность снижения параметра среднеарифметической высоты поверхности Sa до чрезвычайно малой величины 11,800 нм за счет комбинированной размерной и финишной обработки нержавеющей стали. Выполнен электростатический расчет напряженности электрического поля на дефектах поверхности анода на наноуровне в программе COMSOL Multiphysics. Показано, что при формировании пленки окисного слоя, препятствующей прохождению электрических разрядов, формируется высокая напряженность электрического поля между пиками дефектов и границей окисного слоя до $2,3 \cdot 10^{11}$ В/м. Показано, что уменьшение параметра шероховатости поверхности Ra возможно до чрезвычайно малых величин Ra 0,004 мкм на базовой длине 10 мкм, что приводит к уменьшению числа микродефектов и увеличению свободной энергии Гиббса, уменьшению плотности тока коррозии в 3,6 раза. Повышение коррозионной стойкости за счет комбинированной струйной электролитно-плазменной технологии может быть использовано для обработки нержавеющей стали, используемых в нефтегазовой отрасли, таких как трубопроводы, технологические емкости, запорная арматура, турбинные лопатки.

Ключевые слова: анод, электролит, струя, плазма, наношероховатость Ra , электростатика, электронная, атомно-силовая микроскопия, коррозионная стойкость.

Благодарности. Авторы выражают благодарность графическому дизайнеру Диане Александровне Поповой за подготовку иллюстраций. Статья представлена по итогам V международной отраслевой конференции «Материалы и технологии в нефтегазовой отрасли» (21–23 мая 2025 г., Санкт-Петербург, Российская Федерация).

Для цитирования:

Попов А.И., Теплухин В.Г., Радкевич М.М., и др. Формирование наноперехностей нержавеющей сталей с повышенной коррозионной стойкостью за счет струйной электролитно-плазменной обработки // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 118–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>



A.I. Popov¹ ✉, V.G. Teplukhin¹,
M.M. Radkevich¹, S.V. Belyakov², I.I. Vlasov³

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

³ National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”, Moscow, Russia

✉ popov_ai@spbstu.ru

FORMATION OF NANOSURFACES OF STAINLESS STEELS WITH INCREASED CORROSION RESISTANCE DUE TO JET ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT

Abstract. The work is aimed at studying the corrosion properties of stainless steels after reducing the Ra surface roughness parameter by jet electrolyte-plasma treatment. The studies were conducted using electron and atomic force microscopy and standard corrosion tests. During the study, the reduction of the Ra surface roughness parameter and the surface morphology of the samples were examined for stainless steels 20Kh13, 08Kh18N9T, AISI 304, AISI 310, AISI 316L, and the nickel heat-resistant alloy EP648. The initial surface of the samples was obtained by rolling, sawing with a mechanical hacksaw, SLM technology and electroplasma jet technology. For the first time, it was shown that the average surface height Sa can be reduced to an extremely low value of 11.800 nm by combining dimensional and finishing processing of stainless steel. An electrostatic calculation of the electric field strength on the surface defects of the anode was performed. It has been shown that the surface roughness parameter Ra can be reduced to an extremely low value of Ra 0.004 μm on a base length of 10 μm , which leads to a decrease in the number of microdefects and an increase in the Gibbs free energy, as well as a 3.6-fold decrease in the corrosion current density. The increased corrosion resistance achieved through the combined use of electroplasma and jetting technologies can be used for the treatment of stainless steels used in the oil and gas industry, such as pipelines, process vessels, valves, turbine blades.

Keywords: anode, electrolyte, jet, plasma, Ra nanoroughness, electrostatics, electron, atomic force microscopy, corrosion resistance.

Acknowledgements: The authors would like to thank graphic designer Diana Popova for preparing the illustrations. This article was presented at the 5th International Industry Conference “Materials and Technologies in the Oil and Gas Industry” (May 21–23, 2025, St. Petersburg, Russian Federation).

Citation:

Popov A.I., Teplukhin V.G., Radkevich M.M. et al., Formation of nanosurfaces of stainless steels with increased corrosion resistance due to jet electrolyte-plasma treatment, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 118–133, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31409>

Введение. Повышение коррозионной стойкости сталей является актуальной задачей. Это связано как со значительными экономическими потерями, так и рисками возникновения аварийных ситуаций для различных металлоконструкций [1]. Нержавеющие стали, широко используемые в нефтегазовой отрасли в качестве трубопроводов, технологических емкостей, запорной арматуры, также испытывают недостаток антикоррозионных свойств [2–4]. Поэтому в разных случаях для защиты поверхности нержавеющей стали дополнительно используется нанесение покрытий всех типов, обезуглероживание поверхности, катодная защита и другие способы [1, 5–8]. Одним из способов повышения коррозионной стойкости является снижение поверхностной энергии за счет выравнивания и уменьшения шероховатости поверхности [9]. Это приводит к увеличению свободной энергии Гиббса системы и препятствует прохождению коррозионных процессов, что ведет к повышению коррозионной стойкости материала в целом [10]. Одним из методов снижения шероховатости является электролитно-плазменная обработка [11, 12]. Данный метод можно разделить на два основных вида: обработку в электролитической ванне [13] и обработку струей электролита [14]. Каждый вид обработки имеет свои преимущества: для обработки в ванне это универсальность способа, не зависящая от формы изделия; для обработки струей электролита – более высокие параметры точности, скорости, экологичности [15]. К важным преимуществам струйной обработки можно отнести более низкий параметр шероховатости поверхности Ra . Однако при достаточно тщательном изучении влияния электролитно-плазменной обработки на коррозионную стойкость различных материалов в электролитической ванне [16–26] работ, посвященных обработке нержавеющей стали струей электролитической плазмы, недостаточно [27].

Целью работы является повышение коррозионных свойств нержавеющей стали за счет снижения параметра шероховатости поверхности Ra до наноуровня струйной электролитно-плазменной обработкой. Задачами работы являются:

- оценка толщины модифицированного слоя;
- анализ параметра шероховатости поверхности Ra для разных периодов времени обработки;
- оценка толщины обезуглероженного слоя;
- оценка коррозионных свойств поверхности.

Методы и материалы

В исследовании использовалась экспериментальная установка для струйной электролитно-плазменной обработки. Установка разработана и запатентована в ВШМ, ИММиТ, СПбПУ [28]. Сущность процесса заключается в комбинированной обработке поверхности нержавеющей стали (рис. 1). В начале происходит обработка струей электролита при достаточно больших объемных расходах электролита ($Q = 10–300$ л/ч) и небольших напряжениях ($U = 20–130$ В). Затем выполняется финишная обработка поверхности с использованием диффузного объемного разряда ($Q = 2–10$ л/ч) и повышенном напряжении ($U = 200–360$ В) Комбинированной обработке электролитной плазмой подвергались нержавеющей стали 20Х13, 08Х18Н9Т, AISI 304, AISI 310, AISI 316L, а также никелевый жаропрочный сплав ЭП648.

В качестве оборудования для измерения шероховатости поверхности были использованы: прибор измерения шероховатости профилометр MarSurf M 400 (Германия), профилометр MarSurf PS10 (Германия) со стандартным щупом РНТ6-350, координатно-измерительная машина (КИМ) Mitutoyo модели Crysta-Apex S574 серии 191 (Япония).

Для оценки морфологии поверхности использовались: металлографический микроскоп МЕТАМ ЛВ 31 (ЛОМО, Россия), растровый электронный микроскоп SUPRA 55VP-25-78 (Германия), растровый электронный микроскоп модели Fei Inspect F50 (США) и атомно-силовой микроскоп модели Ntegra Aura (Россия).

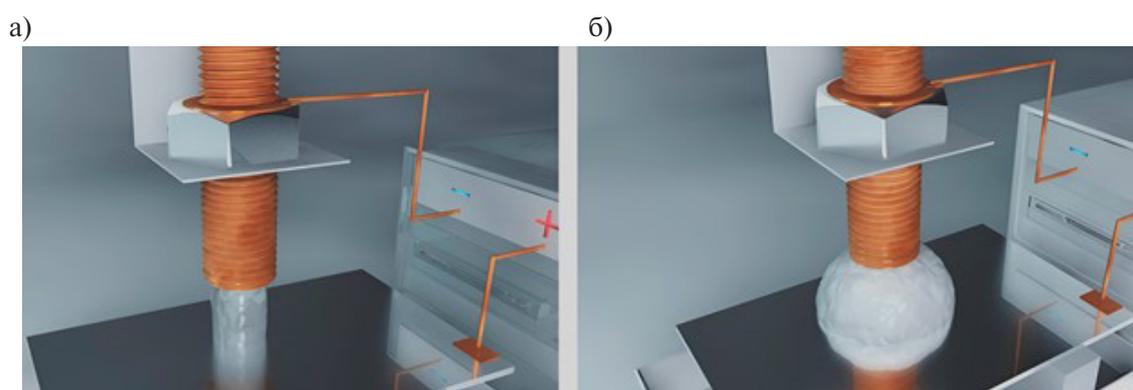


Рис. 1. Принципиальные схемы формирования электролитно-плазменных разрядов ($Q = 2\text{--}300$ л/ч):
 а) электролитно-плазменный разряд, формируемый в струе электролита ($Q = 10\text{--}300$ л/ч);
 б) диффузный объемный разряд ($Q = 2\text{--}10$ л/ч)

Fig. 1. Schematic diagrams of the formation of electrolyte-plasma discharges ($Q = 2\text{--}300$ l/h):
 a) electrolyte-plasma discharge formed in an electrolyte jet ($Q = 10\text{--}300$ l/h); b) diffuse volume discharge ($Q = 2\text{--}10$ l/h)

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений линейных размеров¹ по оси вертикальной оси «Z» атомно-силового микроскопа не более $\pm 5\%$.

Стандартные испытания коррозионных характеристик проводили в среде соленого раствора 3,5% NaCl с помощью потенциостата с программным обеспечением трехэлектродной ячейки, состоящей из рабочего электрода, электрода сравнения (Ag/AgCl) и вспомогательного электрода (Pt).

Для испытаний использовали образец площадью 1 см^2 . Предварительно поверхность образца подвергали электролитно-плазменному полированию, затем обезжировали в ацетоне и промывали дистиллированной водой. Во время испытания фиксировали зависимость потенциала E от логарифма плотности тока $\ln j$. Анодный и катодный наклоны (b_a , b_k) рассчитывали, как тангенсы углов наклона анодной и катодной ветвей. Для расчета скорости коррозии использовали закон Фарадея:

$$v = \frac{I_{corr} * M}{n * F * \rho * A} * K, \quad (1)$$

где I_{corr} – ток коррозии, А; M – молярная масса металла; n – валентность металла в реакции; F – постоянная Фарадея; ρ – плотность, г/см³; A – площадь образца, м²; K – коэффициент пересчета единиц.

Ток коррозии вычислялся по следующей формуле:

$$I_{corr} = \frac{b_a * b_k}{2.303 * (b_a + b_k)} * R_p^{-1}, \quad (2)$$

где b_a , b_k – кривые Тафеля (анодная и катодная); R_p^{-1} – поляризационное сопротивление.

¹ Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE; ГОСТ Р 8.700-2010. Национальный стандарт Российской Федерации. Государственная система обеспечения единства измерений. Методика измерений эффективной высоты шероховатости поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа. State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope.

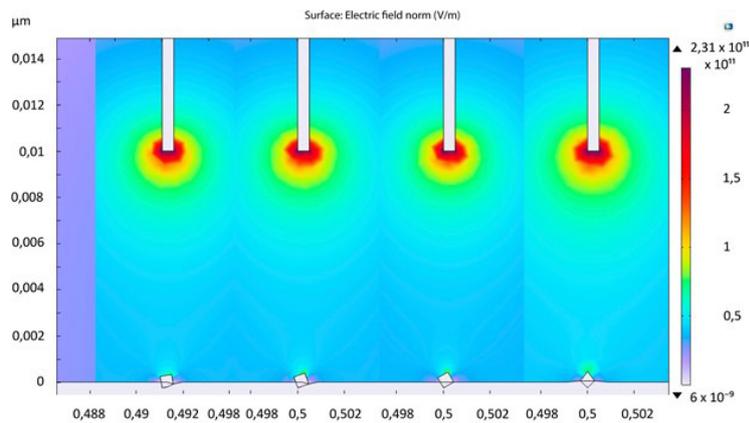


Рис. 2. Моделирование напряженности электрического поля на микродефектах в прианодной зоне
 Fig. 2. Modeling of the electric field strength on microdefects in the anode zone

Результаты моделирования напряженности электрического поля

Возникающий при электролитно-плазменной обработке единичный электрический разряд различается по широкому спектру энергий. Это зависит от многих факторов величины напряжения, проводимости среды, высоты межэлектродного промежутка. При оценке напряженности электрического поля величину напряжения принимали 300 В, высоту межэлектродного промежутка – 10 нм. Величина напряжения соответствует рациональным режимам финишной обработки, а высота межэлектродного промежутка при возникновении разряда, подобного тлеющему, соответствует толщине оксидного слоя на поверхности анода (рис. 2).

Расчет производился по формуле:

$$\text{div}(\epsilon \text{grad}U) = -\rho, \tag{3}$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость; U – потенциал поля; ρ – объемная плотность свободных зарядов.

Принимая, что:

$$\rho = 0 \tag{4}$$

используя векторный дифференциальный оператор Гамильтона ∇ :

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla U) = -\rho, \quad E = -\nabla U, \tag{5}$$

где ∇ – оператор набла (Гамильтона); E – вектор напряженности электрического поля.

Для 2D моделирования, выражение (5) можно записать как:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho, \quad E_x = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}. \tag{6}$$

Результаты

Оценка толщины модифицированного слоя

Оценка толщины модифицированного слоя проводилась для никелевого жаропрочного сплава ЭП648, полученного технологией SLM. Жаропрочный сплав ЭП648 был предварительно

обработан в электролитической ванне на стандартных режимах. Результаты замеров глубины модифицированного слоя для ЭП648 при направленном снижении шероховатости поверхности Ra 0,4 мкм составляют в среднем 50 мкм. Измерение толщины модифицированного слоя для стали 08X18H9T при направленном снижении шероховатости струей электролитной плазмы до Ra 0,020 мкм представляет определенную трудность и требует проведения дополнительных исследований.

Динамика изменения параметра шероховатости поверхности Ra

В процессе комбинированной струйной электролитно-плазменной поверхности зафиксировано изменение параметра шероховатости поверхности Ra и морфологии поверхности. Динамика изменения параметра шероховатости поверхности Ra и морфологии поверхности показана на рис. 3.

Изменение параметра шероховатости поверхности Ra оценивалось для образцов, полученных после пиления ножовочной пилой с исходным параметром шероховатости $Rz > 160$ мкм. Однако снизить одним технологическим приемом шероховатость поверхности с 1-го класса до 14-го не представляется возможным. Поэтому в нашем случае использовалась комбинированная обработка, включающая в себя предварительную электролитическую обработку струей с последующей обработкой сфокусированным разрядом электролитной плазмы. Измеренные параметры² для 3D формы поверхности представлены в табл. 1.

Исследования показывают, что электрохимическая обработка струей электролита позволяет получить минимальный параметр шероховатости поверхности Ra 0,2 мкм. С этого уровня шероховатости электролитно-плазменный разряд, шадяще воздействуя на микронеровности поверхности, «распыляет» микронеровности профиля, при этом сглаживая поверхность до более низких величин параметра шероховатости Ra 0,012 мкм. По технологическому времени обработки струйная обработка имеет преимущества перед обработкой в ванне [14, 15, 27, 28]. Время струйной обработки в значительной мере зависит от эффективной площади катода, межэлектродного зазора и химического состава электролита.

Для сталей AISI 304, AISI 310, AISI 316L, для никелевого жаропрочного сплава ЭП648, полученного технологией SLM, наблюдается меньшее снижение параметра шероховатости поверхности. Для сталей AISI 304, AISI 310, AISI 316L это связано с химическим составом самих сталей, более слабо реагирующих на компоненты электролита по сравнению со сталью 08X18H9T.

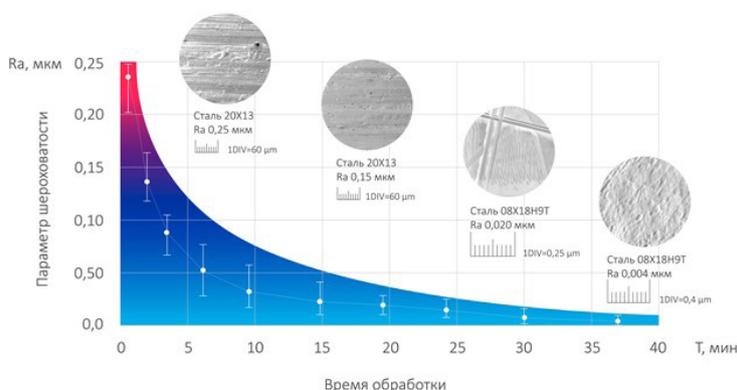


Рис. 3. Изменение параметра шероховатости поверхности Ra и морфологии поверхности в зависимости от времени обработки: образцы 1, 2 – поверхность стали 20X13; образцы 3, 4 – поверхность стали 08X18H9T

Fig. 3. Change in surface roughness parameter Ra and surface morphology depending on processing time:

samples 1, 2 – surface of 20Kh13 steel; samples 3, 4 – surface of 08Kh18N9T steel

² ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters; ISO 25178: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.

Таблица 1

**Параметры 3D поверхности по ISO 21920-2:2021 Nx*Ny,
объем выборки 65536 As, площадь выборки 2499,515 мкм*мкм**

Table 1

**Parameters of the 3D surface according to ISO 21920-2:2021 Nx*Ny,
sampling volume 65536 As, sampling area 2499.515 μm*μm**

Обозначение параметра	Наименование параметра	Среднее значение ординаты	Размерность
Параметры высоты			
Sq	Среднеквадратичная высота поверхности	14,995	нм
Sa	Средняя арифметическая высота поверхности	11,800	нм
Ssk	Эксцесс распределения высоты	3,448	
Ssk	Неравномерность распределения по высоте	-0,151	
Sz	Максимальная высота поверхности	179,623	нм
S10z	Высота десяти точек	142,849	нм
Sp	Максимальная высота пика	141,813	нм
Sv	Максимальная глубина впадины	37,809	нм
Пространственные параметры			
Sds	Плотность вершин поверхности	2,209	1/мкм*мкм
Ssc	Средняя кривизна вершин	0,364	1/мкм
Std	Направление текстуры поверхности	-52,734	град.
Stdi	Индекс направления текстуры поверхности	0,520	
Srw	Радиальная длина волны	50,191	мкм
Srwi	Радиальная длина волны	0,0297	
Гибридные параметры			
Sdq	Среднеквадратичный уклон поверхности	0,0518	
Sdq6	Среднеквадратичный уклон площади	0,0337	
S2A	Проектируемая площадь	2499,515	
S3A	Площадь поверхности	2502,872	
Sdr	Коэффициент площади поверхности	0,134	%
Стандартная статистика. Параметры стандартной статистики			
	Объем выборки	65536	
	Площадь выборки	2499,515	мкм*мкм
	Среднее значение	24,540	нм
	Минимальное	37,809	нм
	Максимальное	141,813	нм
	Расстояние от вершины до пика	179,623	нм
	Среднеквадратичное значение, RMS	14,995	нм
	Средняя шероховатость	11,800	нм
Ssk	Асимметрия	-0,151	
Ska	Эксцесс	3,448	

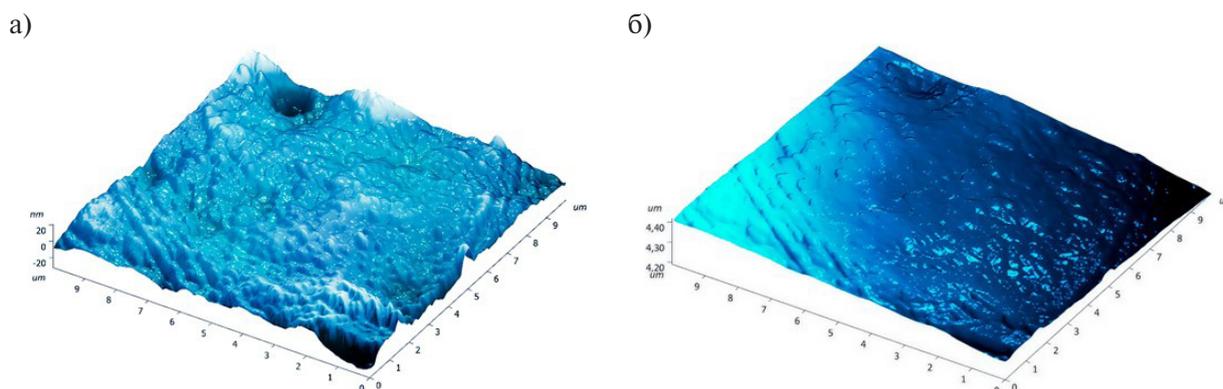


Рис. 4. Поверхность образца из стали 08X18N9T, обработанная комбинированной струйной электролитно-плазменной обработкой, с параметром шероховатости Ra 0,004 мкм: а) диапазон высоты измерения нанощероховатости от $-20,00$ – $20,00$ нм; б) диапазон высоты измерения нанощероховатости $4,20$ – $4,40$ нм

Fig. 4. Surface of a 08X18N9T steel sample treated with a combined jet electrolyte-plasma treatment with a roughness parameter of Ra 0.004 μm : а) nanoroughness measurement height range of -20.00 – 20.00 nm; б) nanoroughness measurement height range of 4.20 – 4.40 nm

Для сплава ЭП648 это прежде всего связано с внутренней ячеистой структурой материала, определяемой технологией SLM [33, 34]. Минимальное полученное значение параметра шероховатости Ra составило Ra 0,004 мкм для площади 10 мкм². Шероховатость поверхности Ra и морфология поверхности приведена на рис. 4.

Оценка морфологии показывает, что поверхность имеет единичный след от искрового разряда.

Проведенные исследования атомно-силовой микроскопией поверхности образцов, обработанных струйной электролитной плазмой, показывают, что уровень амплитуды колебаний кантилевера (уровень сигнала Mag) имеет рассогласования. Это может говорить о разных свойствах поверхности.

Дополнительно к этому подготовка образцов для электронной микроскопии с использованием стандартных травящих растворов Марбле, Хромпика, шавелевой кислоты и ионно-вакуумной очистки в среде аргона показала увеличение времени травления образцов до двух раз.

Это привело к необходимости проверки гипотезы повышения коррозионной стойкости при формировании нанощероховатости после струйной комбинированной обработки стандартными методами испытаний.

Оценка коррозионной стойкости образцов после струйной комбинированной электролитно-плазменной обработки

В процессе стандартных испытаний по коррозионной стойкости были получены кривые Тафеля для образцов без обработки и для образцов, обработанных по комбинированной технологии (рис. 5).

Оценка кривых Тафеля показывает снижение напряжения кривой b_a с 872,16 мВ до 558,54 мВ, что свидетельствует о замедлении процесса анодного растворения. Это может говорить о формировании более стабильного пассивного слоя. Уменьшение напряжения кривой b_k с 109,72 мВ до 67,782 мВ связано с подавлением катодных реакций, например, восстановлением кислорода.

Расчет скорости коррозии

$$v_{\text{кор}} = \frac{I_{\text{кор}} \cdot K \cdot EW}{\rho}, \quad (7)$$

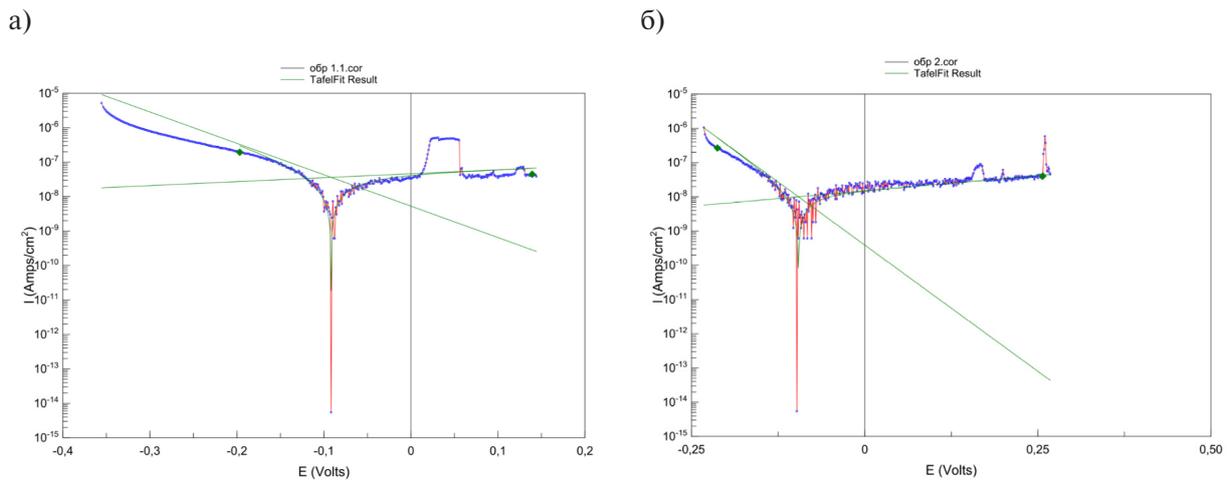


Рис. 5. Кривые Тафеля, полученные на поверхности образца из стали 08X18N9T:

- а) без электролитно-плазменной обработки с исходным параметром шероховатости поверхности Ra 0,4 мкм;
- б) после комбинированной струйной электролитно-плазменной обработки с параметром шероховатости поверхности Ra 11,800 нм

Fig. 5. Tafel curves obtained on the surface of a 08Kh18N9T steel sample:

- a) without electrolyte-plasma treatment with an initial surface roughness parameter Ra of 0.4 μm ;
- b) after combined jet electrolyte-plasma treatment with a surface roughness parameter Ra of 11.800 nm

где $K = 0.00327$ (константа для перевода единиц); $EW = 27.93$ г/моль – эквивалентный вес железа, валентность +2; $\rho = 7.85$ г/см³ – плотность стали; $I_{\text{кор}}$ – плотность тока коррозии: образец 1: $3,619 \cdot 10^{-8}$ А/см²; образец 2: $1,0058 \cdot 10^{-8}$ А/см².

Результаты расчета

Образец с исходным параметром шероховатости поверхности Ra 0,4 мкм:

$$v_{\text{кор}} = \frac{3.619 \cdot 10^{-8} \cdot 0.00327 \cdot 27.93}{7.85} \approx 4.21 \cdot 10^{-5} \text{ мм/год.}$$

Образец после комбинированной струйной электролитно-плазменной обработки с параметром шероховатости поверхности Ra 0,004 мкм:

$$v_{\text{кор}} = \frac{1.0058 \cdot 10^{-8} \cdot 0.00327 \cdot 27.93}{7.85} \approx 1.17 \cdot 10^{-5} \text{ мм/год.}$$

Обсуждение

Анализ проведенных исследований показывает, что коррозионные свойства поверхностного слоя нержавеющей стали в значительной мере зависят от шероховатости поверхности Ra . При струйной электролитно-плазменной обработке наличие развитого макро- и микрорельефа приводит к тому, что между поверхностью (анодом) и противоположным электродом (катодом) на вершинах макро- и микронеровностей возникает высокая напряженность электрического поля, при которой происходит локализация линий напряженности на вершинах и в окрестности макро- микронеровностей с дальнейшим возникновением на их вершинах разряда, подобного тлеющему.

Обработкой поверхности струйным электролитно-плазменным разрядом удалось снизить параметр шероховатости поверхности Ra до чрезвычайно малой величины Ra 0,004 мкм. Это соответствует лучшим мировым достижениям для проволочно-вырезной электроэрозионной обработки (Ra 0,002 мкм), значительно превышает результаты обработки в электролитической ванне (Ra 0,1 мкм) и превосходит результаты по электрохимическому полированию (Ra 0,176 мкм) [13–15, 27, 28].

Уменьшение и сглаживание вершин микронеровностей приводит к тому, что поверхность снижает свою потенциальную энергию. При этом растет энергия Гиббса, что не дает осуществляться самопроизвольным реакциям коррозионного окисления на сглаженных микронеровностях поверхности. При этом поверхность становится значительно более инертной по отношению к окружающей агрессивной среде, что повышает ее коррозионные свойства.

Оценка электрохимических реакций показывает, что после струйной электролитно-плазменной полировки плотность тока коррозии уменьшилась в 3,6 раза. Это указывает на значительное улучшение коррозионной стойкости нержавеющей стали.

В целом для Тафелевских кривых наблюдается смещение потенциала коррозии $E_{\text{корр}}$ в положительную область для поверхности после комбинированной электролитно-плазменной обработки, что характерно для пассивированных поверхностей. Данные экспериментов подтверждаются результатами работ зарубежных и отечественных исследователей по оценке электрохимических реакций [12, 27].

Выводы

1. Минимально достигнутая величина среднеарифметической высоты шероховатости поверхности по площади Sa для выборки 2499,515 мкм*мкм составила 11,800 нм.
2. Минимально достигнутая величина среднеарифметического из абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины 10 мкм составила Ra 0,004 мкм.
3. Электростатический расчет в программе COMSOL Multiphysics показал, что при возникновении пленки двойного окисного слоя формируется высокая напряженность электрического поля между пиками дефектов и границей окисного слоя до $2,3 \cdot 10^{11}$ В/м, что гарантированно приводит к стеканию электрического разряда, подобного тлеющему, на пики дефектов и уменьшению шероховатости поверхности.
4. В процессе электролитно-плазменной обработки может формироваться коррозионно стойкий модифицированный слой толщиной до 50 мкм.
5. Скорость коррозии поверхности после струйной электролитно-плазменной обработки снижена на 72%. Плотность тока коррозии $I_{\text{кор}}$ уменьшилась в 3,6 раза.
6. Изменение параметров Тафеля подтверждает модификацию поверхности.
7. Уменьшение параметра шероховатости поверхности Ra способствует образованию плотного поверхностного оксидного слоя, подавляющего электрохимические реакции.
8. Низкие значения $I_{\text{кор}} < 40$ нА/см² характерны для пассивных нержавеющей сталей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Голдобина Л.А., Шкрабак В.С., Орлов П.С.** Предупреждение аварий и катастроф на катодно-защищенных подземных трубопроводах бесконтактными методами идентификации коррозионного разрушения. Ярославль: ФГБОУВПО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», 2012. 204 с.

[2] **Власенко М.М.** Підвищення корозійної стійкості сталі 20 при електролітичному боруванні // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. Т. 102, № 4. С. 77–82.

- [3] **Шаехов М.Ф., Кадыров Ф.Ф., Гатина Э.Б.** Повышение коррозионной стойкости нержавеющей сталей путем обработки высокочастотной плазмой пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 17. С. 40–41.
- [4] **Zuo Z., Zhang J., Hou Q., Zhang C., Wang K., Duan J., Chen X., Hou B.** Study on the effect of different cathodic protection potentials on the growth of mixed bacteria and cathodic protection efficiency. *Chemistry*. 7(2) (2025) 54. DOI: 10.3390/chemistry7020054
- [5] **Кононенко Р.В., Майзель И.Г.** Диагностика нефтепромысловых трубопроводов с внутренним защитным покрытием на основе эпоксидной смолы // Вестник ИргТУ. 2012. Т. 71, № 12. С. 50–53.
- [6] **Кононенко Р.В., Майзель И.Г.** Контроль качества внутреннего покрытия трубопровода // Вестник ИргТУ. 2013. Т. 77, № 6. С. 17–21.
- [7] **Осербаева А.К., Нуруллаев Ш.П., Гуро В.П.** Термодинамика ингибирования коррозии сталей в присутствии азот и фосфорсодержащих соединений // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2019. Т. 62, № 5. С. 61–65.
- [8] **Паршутин В.В., Пасинковский Е.А., Парамонов А.М., Коваль А.В., Чернышева Н.В.** Новые способы повышения коррозионной стойкости металлов химико-термической обработкой при анодном электролитном нагреве // Электронная обработка материалов. 2012. Т. 48, № 1. С. 88–92.
- [9] **Исламова А.Г., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г.** Влияние шероховатости на поверхностную энергию и смачиваемость поверхностей меди и стали // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7, № 1 (25). С. 60–78. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78
- [10] **Андреев Ю.Я.** Вакансионная термодинамическая модель поверхностной энергии твердых металлов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2012. Т. 48, № 1. С. 29–38.
- [11] **Крит Б.Л., Кусманов С.А.** Перспективы локальной плазменно-электролитной обработки // Быстрозакаленные материалы и покрытия. 2024. С. 147–151.
- [12] **Синькевич Ю.В.** Влияние электроимпульсного полирования на коррозионную стойкость углеродистых конструкционных и коррозионностойких сталей // Инновационные технологии в машиностроении (ред. В.П. Табаков, Д.В. Кравченко). 2022. С. 126–131.
- [13] **Danilov I., Paul R., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M., Quitzke S., Schubert A.** Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel. *Procedia CIRP*, 95 (2020) 981–986. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.255
- [14] **Quitzke S., Danilov I., Morgenstern R., Martin A., Lampke T., Schubert A.** Microstructure and topography of laterally confined porous anodic oxides produced with high growth rate in a maskless two-phase jet setup. *Journal of Applied Electrochemistry*, 55 (2025) 753–768. DOI: 10.1007/s10800-024-02192-y
- [15] **Quitzke S., Kröning O., Safranchik D., Zeidler H., Danilov I., Martin A., Böttger-Hiller F., Essel S., Schubert A.** Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 1123–1133. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.064
- [16] **Корякина С.Р.** Влияние анодной электролитно-плазменной обработки на коррозионное поведение поверхности // Ступени роста – 2018. 2018. С. 74.
- [17] **Volosova M.A., Kusmanov S.A., Tambovskiy I.V., Mukhacheva T.L., Mitrofanov A.P., Suminov I.V., Grigoriev S.N.** Increasing the wear and corrosion resistance of a CP-Ti surface by Plasma Electrolytic Borocarburing and Polishing. *Surfaces*, 7 (4) (2024) 824–837. DOI: 10.3390/surfaces7040054
- [18] **Нагулин К.Ю., Коновалова О.А., Вейнов В.П., Котков А.О.** Исследование влияния электролитно-плазменной обработки поверхности медицинского инструмента на повышение ее коррозионной стойкости // Бутлеровские сообщения. 2022. Т. 72, № 11. С. 114–119. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-114
- [19] **Кусманов С.А., Силкин С.А., Белкин П.Н.** Особенности коррозионного поведения стали после электролитно-плазменного диффузионного насыщения и полирования // Современные электрохимические технологии и оборудование – 2019. 2019. С. 336–338.

- [20] **Кусманов С.А., Силкин С.А., Белкин П.Н.** Влияние электролитно-плазменного полирования на коррозионную стойкость конструкционных сталей после их анодного насыщения азотом, бором и углеродом // *Электрохимия*. 2020. Т. 56, № 4. С. 385–394. DOI: 10.31857/S042485702004009X
- [21] **Примак Д.Ю.** Влияние режимов обработки электролитно-плазменной нитроцементации на изменение коррозионной стойкости стали // *Ступени роста* – 2019. 2019. С. 118–119.
- [22] **Рахадиллов Б.К., Кусаинов Р.К., Бақыт Ж.Ә., Байжан Д.Р., Қадырболат Н.Е.** Трибологические и коррозионные свойства сталей 45 и 65Г, используемых в сельскохозяйственной технике, после электролитно-плазменного упрочнения // *Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки*. 2024. Т. 15, № 3. С. 388–397. DOI: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-48
- [23] **Ширвель А.А., Касач А.А., Кубрак П.Б., Курило И.И.** Влияние электролитно-плазменной обработки Ti на его коррозионное поведение в биологических средах // *Инновационные материалы и технологии*. 2022. С. 256–258.
- [24] **Кусманов С.А., Гришина Е.П., Белкин П.Н., Кусманова Ю.В., Кудрякова Н.О.** Повышение коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей электролитно-плазменным насыщением азотом и углеродом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017. Т. 740, № 2. С. 52–59.
- [25] **Курбанбеков Ш.Р., Мусахан Н.П., Халик С.Ш.** Влияние электролитно-плазменной обработки на фазовый состав и коррозионную стойкость поверхности нержавеющей стали 12X18H10T // *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2024. № 3. С. 3–7.
- [26] **Дьяков И.Г.** Коррозионные свойства сталей после анодного электролитно-плазменного насыщения азотом и углеродом // *Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии*. 2017. С. 6.
- [27] **Ghezri A., Pratama K., Scholl Y., Küenzi A., Nelis T., Burger J., Bessire C.** Energy Efficient jet polishing via electrolytic plasma enhances corrosion resistance in stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (2024) 289. DOI: 10.3390/jmmp8060289
- [28] **Попов А.И.** Гидродинамические особенности струйного электролитно-плазменного разряда // *Технология машиностроения*. 2023. № 6. С. 5–17. DOI: 10.34641/ТМ.2023.252.6.043
- [29] *Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE*
- [30] ГОСТ Р 8.700-2010 НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Государственная система обеспечения единства измерений МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope.
- [31] ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [32] ISO 25178: Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.
- [33] **Babič M., Šturm R., Gălăţanu T.-F., Száva I.-R., Száva I.** Modeling Porosity Surface of 3D Selective Laser Melting Metal Materials. *Fractal Fract.* 9 (2025) 331. Технические условия ТУ 4254-001-58699387-2010: Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к микроскопам, сканирующим зондовым Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE390/fractalfract9060331
- [34] **Long T., Yu J., Long Y., Suo M., Zhou J.** A novel coupling approach of smoothed particle hydrodynamic with discrete element method for simulating selective laser melting process, *Physics of Fluids*. 37 (3) (2025). DOI: 10.1063/5.0256271

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОПОВ Александр Иннокентьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: popov_ai@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5227-1094>

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>

РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: radmich@mail.ru

БЕЛЯКОВ Сергей Владимирович – аспирант, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), без степени.

E-mail: gidravlik2013@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3864-6855>

ВЛАСОВ Иван Игоревич – инженер, НИЦ «Курчатовский Институт» – ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, без степени.

E-mail: vlasovteh@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1857-9109>

REFERENCES

[1] **L.A. Goldobina, V.S. Shkrabak, P.S. Orlov**, Preduprezhdenie avarii i katastrof na katodnozaschishchennykh podzemnykh truboprovodakh beskontaktnymi metodami identifikatsii korrozionnogo razrushe-niia [Prevention of accidents and disasters on cathodically protected underground pipelines using non-contact methods for identifying corrosion damage]. Iaroslavl': FGBOUVPO «Iaroslavskaiia gosudarstvennaia sel'skokhoziaistvennaia akademiia», 2012. 204 p.

[2] **M. Vlasenko**, Increase of corrosion stability of steel 20 at electrolytic borating. Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 4 (102) (2013) 77–82.

[3] **M.F. Shaekhov, F.F. Kadyrov, E.B. Gatina**, Povyshenie korrozionnoi stoikosti nerzhavieushchikh stalei putem obrabotki vysokochastotnoi plazmoi ponizhennogo davleniia [Improving the corrosion resistance of stainless steels by treating them with high-frequency, low-pressure plasma]. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University], 15 (17) (2012) 40–41.

[4] **Z. Zuo, J. Zhang, Q. Hou, C. Zhang, K. Wang, J. Duan, X. Chen, B. Hou**, Study on the effect of different cathodic protection potentials on the growth of mixed bacteria and cathodic protection efficiency. Chemistry, 7(2) (2025) 54. DOI: 10.3390/chemistry7020054

[5] **R.V. Kononenko, I.G. Maizel**, Diagnosis of gathering lines with internal epoxy resin-based protective coating. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 12 (71) (2012) 50–53.

[6] **R.V. Kononenko, I.G. Maizel**, Quality control of pipeline internal coating. Proceedings of Irkutsk State Technical University, 6 (77) (2013) 17–21.

[7] **A.K. Oserbaeva, S.P. Nurullaev, V.P. Guro**, Thermodynamics of inhibiting corrosion of steels in the presence of nitrogen and phosphorus containing compounds. Eurasian Union of Scientists, 5 (62) (2019) 61–65.

[8] **V.V. Parshutin, E.A. Pasinkovskii, A.M. Paramonov, A.V. Koval', N.V. Chernysheva**, Novye sposoby povysheniia korrozionnoi stoikosti metallov khimiko-termicheskoi obrabotkoi pri anodnom elektrolitnom nagreve [New methods for increasing the corrosion resistance of metals by chemical-thermal treatment with anodic electrolytic heating]. *Electronic Processing of Materials*, 1 (48) (2012) 88–92.

[9] **A.G. Islamova, D.V. Feoktistov, E.G. Orlova**, Influence of the copper and steel surfaces' roughness on surface energy and wettability. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 1 (7) (2021) 60–78. DOI: 10.21684/2411-7978-2021-7-1-60-78

[10] **Iu.Ia. Andreev**, Vakansionnaia termodinamicheskaiia model' poverkhnostnoi energii tverdykh metallov [Vacancy thermodynamic model of the surface energy of solid metals]. *Fizikokhimiia poverkhnosti i zashchita materialov* [Surface physicochemistry and material protection], 1 (48) (2012) 29–38.

[11] **B.L. Krit, S.A. Kusmanov**, Perspektivy lokal'noi plazmenno-elektrolitnoi obrabotki [Prospects of local plasma-electrolyte treatment]. *Bystrozakalennyye materialy i pokrytiia* [Rapidly hardened materials and coatings], (2024) 147–151.

[12] **Y.V. Sinkevitch**, Influence of electric pulse polishing on the corrosion resistance of carbon structural and corrosion resistant steels. *Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii* [Innovative technologies in mechanical engineering] (eds. V.P. Tabakov, D.V. Kravchenko), (2022) 126–131.

[13] **I. Danilov, R. Paul, M. Hackert-Oschätzchen, M. Zinecker, S. Quitzke, A. Schubert**, Random sequential simulation of the resulting surface roughness in plasma electrolytic polishing of stainless steel. *Procedia CIRP*, 95 (2020) 981–986. DOI: 10.1016/j.procir.2020.02.255

[14] **S. Quitzke, I. Danilov, R. Morgenstern, A. Martin, T. Lampke, A. Schubert**, Microstructure and topography of laterally confined porous anodic oxides produced with high growth rate in a maskless two-phase jet setup. *Journal of Applied Electrochemistry*, 55 (2025) 753–768. DOI: 10.1007/s10800-024-02192-y

[15] **S. Quitzke, O. Kröning, D. Safranchik, H. Zeidler, I. Danilov, A. Martin, F. Böttger-Hiller, S. Essel, A. Schubert**, Design and setup of a jet-based technology for localized small scale Plasma electrolytic Polishing. *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 1123–1133. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.064

[16] **S.R. Koriakina**, Vliianie anodnoi elektrolitno-plazmennoi obrabotki na korrozionnoe povedenie poverkhnosti [The influence of anodic electrolytic plasma treatment on the corrosion behavior of the surface]. *Stupeni rosta – 2018* [Stages of growth – 2018], (2018) 74.

[17] **M.A. Volosova, S.A. Kusmanov, I.V. Tambovskiy, T.L. Mukhacheva, A.P. Mitrofanov, I.V. Suminov, S.N. Grigoriev**, Increasing the wear and corrosion resistance of a CP-Ti surface by Plasma Electrolytic Borocarburing and Polishing. *Surfaces*, 7 (4) (2024) 824–837. DOI: 10.3390/surfaces7040054

[18] **K.Yu. Nagulin, O.A. Konovalova, V.P. Veynov, A.O. Kotkov**, Study of the effect of electrolytic-plasma treatment of the surface of a medical instrument on increasing its corrosion resistance. *Butlerov Communications*, 11 (72) (2022) 114–119. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-114.

[19] **S.A. Kusmanov, S.A. Silkin, P.N. Belkin**, Osobennosti korrozionnogo povedeniia stali posle elektrolitno-plazmennogo diffuzionnogo nasyscheniia i polirovaniia [Features of corrosion behavior of steel after electrolytic-plasma diffusion saturation and polishing]. *Modern Electrochemical Technologies and Equipment – 2019*, (2019) 336–338.

[20] **S.A. Kusmanov, S.A. Silkin, P.N. Belkin**, Effect of plasma-electrolytic polishing on the corrosion resistance of structural steels after their anodic saturation with Nitrogen, Boron, and Carbon. *Russian Journal of Electrochemistry*, 4 (56) (2020) 356–364. DOI: 10.1134/S1023193520040084

[21] **D.Iu. Primak**, Vliianie rezhimov obrabotki elektrolitno-plazmennoi nitrotsementatsii na izmenenie korrozionnoi stoikosti stali [The influence of electrolytic plasma nitrocarburing processing modes on the change in corrosion resistance of steel]. *Stupeni rosta – 2019* [Stages of growth – 2019], (2019) 118–119.

[22] **B. Rakhadilov, P. Kussainov, Zh. Bakyt, D. Baizhan, N. Kadyrbolat**, Tribological and corrosion properties of 45 and 65G steels used in agricultural machinery after electrolytic-plasma hardening. *Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences*, 3 (15) (2024) 388–397. DOI: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-48

- [23] **A.A. Shirvel', A.A. Kasach, P.B. Kubrak, I.I. Kurilo**, Vliianie elektrolitno-plazmennoi obrabotki Ti na ego korrozionnoe povedenie v biologicheskikh sredakh [The influence of electrolytic-plasma treatment of Ti on its corrosion behavior in biological environments]. *Innovation Materials and Technologies*, (2022) 256–258
- [24] **S.A. Kusmanov, E.P. Grishina, P.N. Belkin, Yu.V. Kusmanova, N.O. Kudryakova**, Raising the corrosion resistance of low-carbon steels by electrolytic-plasma saturation with nitrogen and carbon. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, 2 (740) (2017) 52–59.
- [25] **Sh.R. Kurbanbekov, N.P. Musakhan, S.Sh. Khalik**, Vliianie elektrolito-plazmennoi obrabotki na fazovyi sostav i korrozionnuu stoikost' poverkhnosti nerzhaveiushchei stali 12KH18N10T [The influence of electrolytic plasma treatment on the phase composition and corrosion resistance of the surface of 12X18H10T stainless steel]. *Nauka, novye tekhnologii i innovatsii Kyrgyzstana* [Science, new technologies and innovations in Kyrgyzstan]. 3 (2024) 3–7.
- [26] **I.G. D'iakov**, Korrozionnye svoystva stali posle anodnogo elektrolitno-plazmennogo насыshcheniia azotom i uglerodom [Corrosion properties of steels after anodic electrolyte-plasma saturation with nitrogen and carbon]. *Sovremennye metody v teoreticheskoi i eksperimental'noi elektrokhemii* [Modern methods in theoretical and experimental electrochemistry]. 2017. S. 6.
- [27] **A. Ghezri, K. Pratama, Y. Scholl, A. Küenzi, T. Nelis, J. Burger, C. Bessire**, Energy Efficient jet polishing via electrolytic plasma enhances corrosion resistance in stainless steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8 (2024) 289. DOI: 10.3390/jmmp8060289
- [28] **A.I. Popov**, Gidrodinamicheskie osobennosti struynogo elektrolitno-plazmennogo razriada. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 6 (2023) 5–17. DOI: 10.34641/TM.2023.252.6.043
- [29] TU 4254-001-58699387-2010 *Texnicheskie usloviya: Normativny'e i texnicheskie dokumenty'*, ustanavlivayushhie trebovaniya k mikroskopam, skaniruyushhim zondovy'm Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE [Regulatory and Technical Documents Establishing Requirements for Microscopes, Scanning Probe Microscopes Ntegra SPECTRA, Ntegra PRIMA, Ntegra VITA, Ntegra THERMA, Ntegra AURA, Ntegra MAXIMUS, Ntegra SOLARIS, Ntegra SOLARIS Duo, Ntegra TOMO, Ntegra LIFE]. Moscow. "MDT Nanotechnology" 2010, 8 p. (In Russ).
- [30] GOST R 8.700-2010 *Natsional'ny'j standart rossijskoj federatsii gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij metodika izmerenij e'ffektivnoj vy'soty' sheroxovatosti poverkhnosti s pomoshch'yu skaniruyushhego zondovogo atomno-silovogo mikroskopa* [State system for ensuring the uniformity of measurements. Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope] Publ., 2010, 12 p. (In Russ).
- [31] ISO 21920-2:2021 *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.*
- [32] ISO 25178: *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.*
- [33] **M. Babič, R. Šturm, T.-F. Gălățanu, I.-R. Száva, I. Száva**, Modeling porosity surface of 3D selective laser melting metal materials. *Fractal and Fractional*, 9 (6) (2025) 331. DOI: 10.3390/fractalfract9060331
- [34] **T. Long, J. Yu, Y. Long, M. Suo, J. Zhou**, A novel coupling approach of smoothed particle hydrodynamic with discrete element method for simulating selective laser melting process. *Physics of Fluids*, 37 (3) (2025) 033341. DOI: 10.1063/5.0256271

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander I. POPOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
 E-mail: popov_ai@spbstu.ru
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5227-1094>

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

E-mail: cornfield@yandex.ru

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

Mikhail M. RADKEVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: radmich@mail.ru

Sergei V. BELYAKOV – *Bauman Moscow State Technical University.*

E-mail: gidravlik2013@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3864-6855>

Ivan I. VLASOV – *National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”.*

E-mail: vlasovteh@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1857-9109>

Поступила: 20.07.2025; Одобрена: 19.10.2025; Принята: 13.11.2025.

Submitted: 20.07.2025; Approved: 19.10.2025; Accepted: 13.11.2025.

Научная статья

УДК 691.175

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>



Д.А. Пезин¹, Б.С. Ермаков², Д.В. Нечаев² ✉

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ nechaev_dv@spbstu.ru

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Аннотация. В ходе настоящей работы была проведена оценка применимости узлов и деталей электрооборудования, изготовленных из термопластичных полимерных материалов, для эксплуатации в условиях Арктики. В результате было установлено, что использование полимерных композиционных материалов на основе полиамидов и полибутилентерефталатов в условиях экстремально низких температур и высокой влажности воздуха может приводить к развитию аварийных ситуаций из-за резкого снижения деформационной способности материалов. Также было показано, что самым перспективным материалом для изготовления узлов и деталей оборудования, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, является поликарбонат. Однако, несмотря на высокий и стабильный уровень статических механических свойств и ударной вязкости, этот материал не может быть рекомендован для изготовления вентиляторов специального назначения, поскольку использование при выборе материала только прочностных характеристик не обеспечивает гарантии его длительной безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: Арктика, механические свойства, поликарбонат, полимер, фрактография.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка методик определения возможностей и условий применения полимеркомпозитных материалов в качестве строительных конструкций, деталей и узлов оборудования нефтедобывающих предприятий в Арктической и Субарктической зонах России» (FEWN-2025-0005).

Для цитирования:

Пезин Д.А., Ермаков Б.С., Нечаев Д.В. Работоспособность термопластичных полимеров в условиях Арктического региона Российской Федерации // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 134–145. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>*D.A. Pezin¹, B.S. Ermakov², D.V. Nechaev² ✉*¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia;² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia✉ nechaev_dv@spbstu.ru

PERFORMANCE OF THERMOPLASTIC POLYMERS IN THE CONDITIONS OF THE ARCTIC REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION

Abstract. In the course of this work, an assessment of the applicability of components and parts of electrical equipment made from thermoplastic polymeric materials for use in Arctic conditions. As a result, it was established that the use of polyamide- and polybutylene terephthalate-based polymer composite materials under conditions of extremely low temperatures and high humidity can lead to accidents due to a sharp reduction in the materials' deformation capacity. It was also shown that polycarbonate was the most promising material for the manufacture of components and parts of equipment designed for use in the Far North. However, despite its high and stable static mechanical properties and impact strength, this material cannot be recommended for manufacturing special-purpose fans, since relying solely on strength characteristics when selecting a material does not guarantee its long-term safe operation.

Keywords: Arctic, mechanical properties, polycarbonate, polymer, fractography.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "Development of methods for determining the possibilities and conditions for the use of polymer composite materials as building structures, parts and equipment units for oil production enterprises in the Arctic and Subarctic zones of Russia" (FEWN-2025-0005).

Citation:

Pezin D.A., Ermakov B.S., Nechaev D.V., Performance of thermoplastic polymers in the conditions of the Arctic Region of the Russian Federation, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 134–145, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31410>

Введение. Изменение стратегии освоения и разработки запасов сырья в северных условиях потребовало пересмотреть подход к обеспечению надежности, ремонтпригодности [1], увеличению межремонтного периода обслуживания машин и механизмов [2], а достаточно короткий срок эксплуатации малых месторождений – обеспечить легкое перемещение оборудования с одной площадки на другую с минимальными техническими и финансовыми затратами при условии крайне слабой транспортной инфраструктуры в Арктической зоне Российской Федерации [3]. При этом следует учесть тот факт, что опыт применения в условиях северных широт значительного числа аппаратов и приборов, успешно эксплуатируемых в центральных областях страны показал, что их эксплуатация в Арктическом регионе невозможна или затруднена и требует либо модернизации, либо создания принципиально новых приборов, аппаратов, их несущих и корпусных конструкций [4, 5].

Одним из решений повышения надежности и долговечности техники, эксплуатация которой планируется в условиях северных широт, а также облегчения перемещения оборудования с одной площадки на другую является постепенное замещение подверженных коррозионным повреждениям и хрупким разрушениям из-за недостаточной хладостойкости стальных конструкций на полимерные и полимерно-композитные [6–9].

В отечественной и мировой промышленности уже широко применяются различные типы пластмасс, среди которых достаточный объем принадлежит термопластичным материалам [10, 11]. Хотя такие материалы не используются в силовых и строительных конструкциях, они нашли свое применение в качестве корпусов, зубчатых колес, крыльчаток, лопастей вентиляторов и других узлов и деталей различных машин и механизмов [12–14]. Основным ограничением их использования в условиях Арктического региона являются высокие требования к морозостойкости, то есть к способности материалов сохранять заданные физико-механические и эксплуатационные свойства при температурах ниже температуры стеклования для аморфных полимеров или ниже температуры хрупкости для кристаллизующихся полимеров [15]. При этом рядом исследователей [15, 16] показано, что при проектировании и конструировании деталей и узлов электрооборудования, эксплуатируемого в условиях арктического климата, должна быть учтена и стойкость материала к ударным нагрузкам, возникающим при ветровом воздействии, к водопоглощению, а также к повышенным температурам. Поэтому целью настоящей работы являлась оценка применимости узлов и деталей электрооборудования, изготовленных из термопластичных полимерных материалов (ПМ), для эксплуатации в условиях Арктики.

Материалы и методы исследования

Материалами исследования являлись конструкционные термопластичные ПМ с различным уровнем кристалличности: полибутилентерефталат (ПБТ) марки LUPOX серии 1000 производства LG Chem, поликарбонат (ПК) PC-010, изготовленный по ТУ 2226-173-00203335-2007, и полиамид (ПА) 610 литьевой, изготовленный по ГОСТ 10589-87.

Оценка работоспособности ПМ и изменения, происходящие в них в ходе длительной эксплуатации, были выполнены путем проведения механических испытаний в соответствии с ГОСТ 14359-69, ГОСТ 4647-2015, ГОСТ 16782-92, ГОСТ 11262-80 и ГОСТ 26277-84. Интенсивность водопоглощения материалов была определена в соответствии с ГОСТ 4650-80. Фрактографический анализ изломов и поверхности опытных образцов проводили с предварительным напылением на образцы хрома толщиной порядка 30–100 нм на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira 3 LMU. Климатические испытания проводились в камере тепла-влаги-холода (КТВХ) СМ –70/100–1000 ТВХ при следующих параметрах модельной среды: влажность 95–98%; температура $70 \pm 0,5$ °С (средняя допустимая температура корпуса при эксплуатации), $90 \pm 0,5$ °С (аварийные перегрев корпуса) и -70 ± 1 °С (низкотемпературное климатическое воздействие). Время нахождения образцов в климатической камере составляло 200, 500, 1000 и 2400 часов.

Результаты

На первом этапе работы были исследованы наиболее уязвимые свойства ПМ – оценка влияния водопоглощения на механические свойства в условиях низких климатических температур. С этой целью одновременно с образцами для измерения водопоглощения в тех же условиях были экспонированы образцы из ПМ для механических испытаний. Результаты оценки водопоглощения приведены в табл. 1.

Определено, что прирост массы образцов для механических испытаний после 48 часов экспонирования оказался несколько меньше, чем у образцов, подготовленных по ГОСТ 4650-80, и составил у ПА – 2,72%, ПБТ – 0,05%, ПК – 0,24%. Однако тенденция увеличения массы образца во время пребывания в жидкости сохраняется, что позволяет качественно оценить роль водопоглощения в изменении свойств ПМ в ходе эксплуатации в условиях высокой влажности окружающей среды.

В табл. 2 приведены результаты сравнительных испытаний ударной вязкости ПМ в диапазоне температур от 20 до -60 °С (-70 °С для ПК) в исходном, кондиционированном, состоянии и после 48-часового экспонирования образцов в дистиллированной воде.

Таблица 1

Водопоглощение опытных образцов ПМ

Table 1

Water absorption of experimental samples of polymeric materials

Материал	Водопоглощение (%) за период (час)			
	12	24	36	48
ПА	1,93	2,91	2,96	3,02
ПБТ	0,04	0,05	0,05	0,06
ПК	0,21	0,24	0,26	0,27

Таблица 2

Средние и минимальные значения ударной вязкости опытных образцов ПМ
в исходном состоянии и после водопоглощения

Table 2

Mean and minimum values of impact strength of experimental samples of polymeric materials
in the initial state and after water absorption

Материал	Состояние материала	Температура испытания	Средняя ударная вязкость $KCV_{\text{сред}}$	Минимальная ударная вязкость $KCV_{\text{мин}}$
		°C		
ПА	Исходное	20	16,2	14,1
		-60	14,2	12,3
	После водопоглощения	20	14,6	11,6
		-60	3,2	2,2
ПБТ	Исходное	20	6,9	6,3
		-60	1,3	0,4
	После водопоглощения	20	6,8	6,3
		-60	1,2	0,1
ПК	Исходное	20	36,6	33,4
		-70	32,0	29,1
	После водопоглощения	20	35,6	31,3
		-70	34,6	30,4

Как следует из представленных данных, низкотемпературная ударная вязкость ПБТ даже в исходном состоянии крайне мала, что может приводить к хрупким разрушениям конструкций, эксплуатируемых в условиях северных регионов. Анализ изломов образцов ПБТ показал, что при понижении температуры испытания от 20 до -60 °C изменяется механизм разрушения материала – при комнатной температуре основным механизмом разрушения является ямочный отрыв. С понижением температуры доля вязкой составляющей снижается практически до нуля, а основным становится механизм, который можно сравнить с механизмом скола в металлах, когда происходит расщепление кристаллической части полимера по определенным кристаллографическим плоскостям [17].

Ударная вязкость ПА в кондиционированном состоянии сохраняется на достаточно высоком и, главное, стабильном уровне во всем диапазоне исследованных температур, однако образцы



Рис. 1. Округлые поры – следы водонасыщенных кластеров в поверхности разрушения образца ПА после испытаний при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$: а) при увеличении $\times 120$, б) при увеличении $\times 600$

Fig. 1. Rounded pores – traces of water-saturated clusters in the fracture surface of a polyamide sample after testing at $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$: a) $\times 120$ magnification, b) $\times 600$ magnification

после насыщения водой в течение 48 часов при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушаются хрупко, что объясняется высоким уровнем водопоглощения материала, образованием в его структуре водонасыщенных кластеров, образующих при замерзании водонасыщенные скопления, следы которых хорошо видно на поверхностях изломов испытанных образцов (рис. 1).

Так как электрооборудование, установленное и эксплуатируемое на кустовых площадках месторождений нефти и газа, карьерах добычи твердых полезных ископаемых, в ходе эксплуатации подвергается как низким климатическим температурам, так и высокотемпературным нагревам, когда нагрев обмоток двигателя может составлять от $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (класс А) до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (класс F), был проведен второй этап исследования влияния длительных выдержек образцов ПК в климатической камере. Для экспонирования в климатической камере были подготовлены образцы в исходном, кондиционированном, состоянии и после пребывания в воде в течение 48 часов. После старения и захлаживания образцы были испытаны на ударный изгиб и одноосное статическое растяжение. Уровень водопоглощения кондиционированных образцов ПК после старения при $70\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0,14\%$, после захлаживания – менее $0,08\%$. Также были проведены испытания ударной вязкости и прочности при растяжении образцов ПК после 48-часового пребывания в воде. Учитывая высокую склонность ПА к водопоглощению и резкому охрупчиванию материала при низких климатических температурах, решили отказаться от его длительных испытаний в климатической камере, а испытания образцов ПБТ были проведены по той причине, что этот материал максимально широко используется в измерительном и контрольном оборудовании зарубежных фирм, поставляемом, в частности, на нефте- и газодобывающие предприятия страны. Результаты испытаний показаны в табл. 3.

Также в табл. 3 кроме величин механических свойств приведены коэффициенты Y_1 и Y_2 . Использование этих коэффициентов при проектировании и прочностных расчетах изделий и конструкций из ПМ было рекомендовано ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Эти коэффициенты учитывают условия работы ПМ в изделиях и рассчитываются как отношение фактического значения прочности материала к его прочности при $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹. Коэффициент Y_1 отражает изменение прочности ПК под действием температурно-влажностных условий испытаний при растяжении; коэффициент Y_2 – при разрыве.

Анализом результатов испытаний образцов ПБТ после длительных температурных выдержек (табл. 3) определено, что ударная вязкость материала постепенно снижается, приближаясь к нулевым значениям. Именно охрупчивание ПБТ при низких температурах является причиной повышенной аварийности вентиляторов, воздуходувок, корпусов измерительной аппаратуры, эксплуатируемых в условиях экстремально низких температур.

¹ Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. Рекомендации по проектированию и расчету конструкций с применением пластмасс. М., 1969. 149 с.

Таблица 3

Средние и минимальные значения ударной вязкости образцов после старения

Table 3

Mean and minimum values of impact toughness of samples after ageing

Состояние материала	T, °C	KCV, кДж/м ²	Прочность при растяжении s _{рм} , МПа	Y ₁	Прочность при разрыве s _{рр} , МПа	Y ₂	ε _{рр} , %
ПК							
Исходное состояние	20	37,7	65,3	1,0	60,5	1,0	89
	-70	31,2	98,1	1,50	82,0	1,34	44
Старение 70 °C, 500 ч	20	36,6	65,1	1,0	60,0	0,98	86
	-70	30,4	98,0	1,50	80,8	1,32	44
Старение 70 °C, 1000 ч	20	36,2	64,6	1,0	59,3	0,97	83
	-70	28,2	96,8	1,48	79,8	1,31	42
Старение 70 °C, 1000 ч (0,27% воды)	20	30,4	59,9	0,92	57,6	0,95	77
	-70	27,2	96,1	1,47	74,5	1,23	39
Старение 90 °C, 1000 ч (0,27% воды)	20	28,8	54,8	0,84	47,0	0,78	74
	-70	26,9	89,7	1,37	70,2	1,16	36
Захлаживание -70 °C, 500 ч	20	31,0	64,0	0,98	59,8	0,98	82
	-70	28,4	90,2	1,38	72,1	1,18	40
Захлаживание -70 °C, 1000 ч	20	30,2	62,7	0,96	57,8	0,95	77
	-70	28,2	88,3	1,35	70,7	1,16	34
Захлаживание -70 °C, 2400 ч	20	29,2	62,0	0,96	56,9	0,93	71
	-70	27,7	87,9	1,34	69,7	1,15	31
Захлаживание -70 °C, 2400 ч (0,27% воды)	20	26,7	60,4	0,92	55,8	0,92	70
	-70	25,9	84,9	1,30	65,9	1,09	29
ПБТ							
Исходное состояние	20	3,4	48		48	1,0	53
	-60	1,1	—		59	1,23	0
Старение 70 °C, 1000 ч	20	3,4	48		48	1,0	51
	-60	0,7	—		54	1,13	0
Захлаживание -70 °C, 1000 ч	20	6,2	46		47	0,99	46
	-60	0,2	—		49	1,02	0

Результаты проведенных испытаний ПМ хорошо согласуются с данными других авторов [18, 19] и позволяют утверждать, что деградация свойств ПК под действием климатических факторов и условий эксплуатации весьма невелика – снижение коэффициентов Y_1 и Y_2 в условиях штатной эксплуатации оборудования составляет не более 8%.

Однако наряду с весьма позитивными результатами механических свойств ПК следует особое внимание обратить на изломы – поверхности разрушения испытанных образцов. При визуально-измерительном контроле разрушенных образцов ПК в исходном состоянии и после длительных выдержек в климатической камере было определено, что в изломах всех ударных

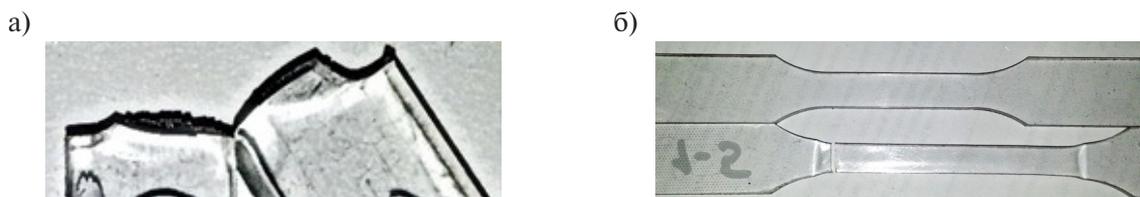


Рис. 2. Разрушение ударного образца (старение при $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении 1000 часов):
 а) деформация и боковые утяжки в зоне излома; б) равномерное удлинение рабочей части образца
 (старение при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении 1000 часов) при статическом растяжении

Fig. 2. Fracture of an impact specimen (ageing at $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1000 hours):
 a) deformation and lateral contractions in the fracture zone; b) uniform elongation
 of the working part of the specimen (ageing at $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1000 hours) under static tension



Рис. 3. Поверхности разрушения образцов поликарбоната после испытаний при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3. Fracture surfaces of polycarbonate samples after testing at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

образцов преобладает вязкий механизм разрушения с большими боковыми утяжками, а на рабочих частях образцов на одноосное растяжение присутствуют следы значительной равномерной утяжки, причем толщина рабочей части образца снизилась почти на 30% за счет перераспределения материала в ходе растяжения (рис. 2).

В то же время фрактографическим анализом поверхности изломов ударных образцов и образцов на статическое растяжение ПК было установлено, что вне зависимости от их состояния (рис. 3) зарождение, развитие и движение магистральной трещины происходит по механизму хрупкого разрушения, а все признаки вязкого разрушения связаны только с общим деформированием образца.

Обсуждение

По результатам проведенных испытаний было показано, что в условиях низких климатических температур применение ПБТ и ПА может привести к хрупким разрушениям, и их использование в условиях открытого воздуха Арктического региона может носить весьма ограниченный характер. В то же время результатами испытаний ПК было подтверждено, что этот материал сохраняет высокую ударную вязкость во всем исследованном диапазоне температур как в кондиционированном состоянии, так и после длительного пребывания в воде.

На основании полученных результатов при оценке влияния старения при 70 °С и захлаживания при –70 °С определено, что деградация свойств ПМ в условиях повышенной влажности постепенно ослабевает, а сам материал сохраняет высокую стабильность статических и динамических свойств после длительных температурных воздействий. Также показано, что самым перспективным материалом для изготовления узлов и деталей оборудования, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, является ПК.

В результате фрактографического анализа определено, что механизм разрушения опытных образцов при ударных нагрузках состоит из двух этапов, где на первом этапе (до образования магистральной трещины) наблюдается равномерное вязкое течение материала, а на втором (с момента образования трещины) разрушение протекает хрупко. То есть наряду с вязкопластическим течением полимера отмечается его практически нулевая трещиностойкость. Таким образом, разрушение ПК носит двоякий характер – до наступления момента возникновения хрупкой магистральной трещины происходит первичная, вязкая, стадия, сопровождающаяся локальными утяжками и утонениями в зоне, а после возникновения трещины – хрупкое разрушение. Этот эффект необходимо учитывать при конструировании деталей и оборудования для регионов холодного и особо холодного климата, в частности электровентиляторов, так как в случае возникновения механических повреждений – царапин, рисок, следов механических ударов и т.п. – может наступить катастрофически быстрое разрушение аппарата.

Заключение

На основании проведенных исследований представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Установлено, что использование наиболее распространенных в условиях средних широт полимерных композиционных материалов на основе ПА и ПБТ в условиях экстремально низких температур и высокой влажности воздуха может приводить к развитию аварийных ситуаций из-за резкого снижения деформационной способности материалов.

2. Определено, что самым перспективным материалом для изготовления узлов и деталей оборудования, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, является ПК. Однако разрушение ПК имеет две стадии развития: первая связана с общим деформированием образца и протекает со значительными пластическими формоизменениями – утяжками ударных образцов и значительным равномерным удлинением рабочей части образцов на статическое растяжение. Такой механизм действует до момента зарождения магистральной трещины, которая развивается по хрупкому механизму разрушения. Поэтому, несмотря на высокий и стабильный уровень статических механических свойств и ударной вязкости, этот материал не рекомендуется для изготовления вентиляторов специального назначения, поскольку использование при выборе материала только прочностных характеристик не обеспечивает гарантии его длительной безопасной эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Толмачев А.А., Иванов В.А., Пономарева Т.Г.** К вопросу о применении труб термопластовых армированных для сооружения нефтегазопроводов в Арктике // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2020. № 4. С. 88–99. DOI: 10.31660/0445-0108-2020-4-88-99
- [2] **Седуш В.Я., Сидоров В.А., Сушко А.Е.** История технического обслуживания и ремонта в России // Главный механик. 2016. Т. 162, № 12. С. 39–54.
- [3] **Кожевников С.А., Патракова С.С.** Транспортная связность северных регионов России: проблемы и инструменты обеспечения // Проблемы развития территории. 2024. Т. 28, № 3. С. 50–66. DOI: 10.15838/ptd.2024.3.131.4
- [4] **Горбунов В.П.** Решение проблем адаптации и эксплуатации систем жизнеобеспечения воздушных судов западного производства в условиях экстремально низких температур Крайнего Севера, Сибири и Арктики // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 50–54.
- [5] **Ермаков Б.С., Швецов О.В.** Эксплуатационные свойства полимерных композиционных материалов в условиях Арктического и Субарктического регионов РФ // Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. 2024. С. 224–230.
- [6] **Погребная И.А., Михайлова С.В., Полищук С.Т., Бабюк Г.Ф.** О применении альтернативных материалов для трубопроводов на месторождениях Крайнего Севера // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации). 2016. Т. 3. С. 73–75.
- [7] **Qureshi J.** A review of fibre reinforced polymer structures, *Fibers*, 10 (3) (2022) 27. DOI: 10.3390/fib10030027
- [8] **Less T., Demir A., Sezen H.** Structural performance and corrosion resistance of fiber reinforced polymer wrapped steel reinforcing bars, *Construction and Building Materials*, 366 (2023) 130176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130176
- [9] **Sajan S., Selvaraj D.P.** A review on polymer matrix composite materials and their applications, *Materials Today: Proceedings*, 47 (15) (2021) 5493–5498. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.034
- [10] **Кацевман М.Л.** Объединенная компания «Полипластик-Технопол» – лидер российского рынка конструкционных материалов на основе термопластов // Пластические массы. 2006. № 10. С. 45–47.
- [11] **Qiao Y., Fring L.D., Pallaka M.R., Simmons K.L.** A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites, *Polymer Composites*, 44 (2) (2023) 694–733. DOI: 10.1002/pc.27139
- [12] **Адхамов А., Нумонов А.** Перспективы применения ПКМ в автомобильной промышленности // ТЕСНика. 2021. Т. 5, № 1. С. 8–13. DOI: 10.24411/2181-0753/2021-100002
- [13] **Лысов Н.А., Янченко А.В.** Анализ использования полимерных материалов в электроприводе воздушного компрессора роботизированного комплекса // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. 2021. С. 120–123.
- [14] **Макаров В.Ф., Песин М.В., Волковский А.А.** Инновационные технологии повышения производительности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 9. С. 27–38. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-27-38
- [15] **Корнев В.А., Рыбаков Ю.Н.** Морозостойкость полимерных, конструкционных материалов и покрытий для применения в технических средствах нефтепродуктообеспечения // Аллея науки. 2018. Т. 23, № 7. С. 78–87.
- [16] **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: 10.18721/JEST.31108
- [17] **Олейник Э.Ф.** Пластичность частично кристаллических гибкоцепных полимеров на микро-мезоуровнях // Высокомолекулярные соединения. Серия С. 2003. Т. 45, № 12. С. 2137–2264.

[18] **Авдеев К.В., Бобров В.В., Тучин М.А., Домарова Е.В., Кудрявцев Н.А., Скакун П.В.** Влияние температуры на физико-механические свойства монолитного поликарбоната // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20, № 1. С. 73–83. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83

[19] **Гасанова Н.А.** Влияние температуры на характер деформации пластмасс, работающих в нефтепромысловых оборудованьях // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 5–3. С. 17–20.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕЗИН Дмитрий Александрович – *руководитель проектов, Тюменский индустриальный университет, канд. социол. наук.*

E-mail: pezinda@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1223-2453>

ЕРМАКОВ Борис Сергеевич – *главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

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>

REFERENCES

[1] **A.A. Tolmachev, V.A. Ivanov, T.G. Ponomareva**, To the issue of application of thermoplastic reinforced pipes for the construction of oil and gas pipelines in the Arctic, *Oil and Gas Studies*, 4 (2020) 88–99. DOI: 10.31660/0445-0108-2020-4-88-99

[2] **V.Y. Sedush, V.A. Sidorov, A.E. Sushko**, History of maintenance and repair in Russia, *Glavnyi mekhanik [Chief mechanic]*, 12 (162) (2016) 39–54.

[3] **S.A. Kozhevnikov, S.S. Patrakova**, Transportation connectivity of Russia's northern regions: Problems and tools for ensuring it, *Problems of Territory's Development*, 28 (3) (2024) 50–66. DOI: 10.15838/ptd.2024.3.131.4

[4] **V.P. Gorbunov**, Solutions for problems of life-support systems adaptation of foreign made aircraft under the conditions extremely low temperatures of Arctic, Siberia and Far North, *Civil Aviation High Technologies*, 218 (2015) 50–54.

[5] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov**, Ekspluatatsionnye svoistva polimernykh kompozitsionnykh materialov v usloviakh arkticheskogo i Subarkticheskogo regionov RF [Performance properties of polymer composite materials in the Arctic and Subarctic regions of the Russian Federation], *Tekhnologii obustroistva nefianykh, gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenii [Technologies for the development of oil, gas and gas condensate fields]*, (2024) 224–230.

[6] **I.A. Pogrebnaia, S.V. Mikhailova, S.T. Polishchuk, G.F. Babiuk**, O primenenii al'ternativnykh materialov dlia truboprovodov na mestorozhdeniakh Krainego Severa [On the use of alternative materials for pipelines in the Far North], *Geologiya i neftegazonosnost' Zapadno-Sibirskogo megabasseina (opyt, innovatsii) [Geology and oil and gas potential of the West Siberian megabasin (experience, innovation)]*, 3 (2016) 73–75.

- [7] **J. Qureshi**, A review of fibre reinforced polymer structures, *Fibers*, 10 (3) (2022) 27. DOI: 10.3390/fib10030027
- [8] **T. Less, A. Demir, H. Sezen**, Structural performance and corrosion resistance of fiber reinforced polymer wrapped steel reinforcing bars, *Construction and Building Materials*, 366 (2023) 130176. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130176
- [9] **S. Sajan, D.P. Selvaraj**, A review on polymer matrix composite materials and their applications, *Materials Today: Proceedings*, 47 (15) (2021) 5493–5498. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.08.034
- [10] **M.L. Katsevman**, Ob"edinennaia kompaniia "Poliplastik-Tekhnopol" – lider rossiiskogo rynka konstruksionnykh materialov na osnove termoplastov [The united company "Polyplastic-Technopol" is the leader in the Russian market of construction materials based on thermoplastics], *Plasticheskie massy [Plastics]*, 10 (2006) 45–47.
- [11] **Y. Qiao, L.D. Fring, M.R. Pallaka, K.L. Simmons**, A review of the fabrication methods and mechanical behavior of continuous thermoplastic polymer fiber–thermoplastic polymer matrix composites, *Polymer Composites*, 44 (2) (2023) 694–733. DOI: 10.1002/pc.27139
- [12] **A. Adkhamov, A. Numonov**, Prospects for application of PCM in the automotive industry, *Technika*, 5 (1) (2021) 8–13. DOI: 10.24411/2181-0753/2021-100002
- [13] **N.A. Lysov, A.V. Yanchenko**, Analysis of the use of polymer materials in the electric drive of an air compressor of a robotic complex, *Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniia k vnedreniiu [Manufacturing Technologies of the Future: From Creation to Implementation]*, (2021) 120–123.
- [14] **V.F. Makarov, M.V. Pesin, A.A. Volkovsky**, Innovative technologies for improving the efficiency and machining operating quality for polymer composite materials, *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 9 (2023) 27–38. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-27-38
- [15] **V.A. Kornev, Iu.N. Rybakov**, Frost resistance of polymer, structural materials and coatings for use in technical goods of hardware petroleum products, *Alleia nauki [Alley of Science]*, 7 (23) (2018) 78–87.
- [16] **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: 10.18721/JEST.31108
- [17] **E.F. Oleinik**, Plasticity of semicrystalline flexible-chain polymers at the microscopic and mesoscopic levels, *Vysokomolekuliarnye soedineniia [High-molecular compounds]*, Series C, 12 (45) (2003) 2137–2264.
- [18] **K.V. Avdeev, V.V. Bobrov, M.A. Tuchin, E.V. Domarova, N.A. Kudryavtsev, P.V. Skakun**, Effect of temperature on physical and mechanical properties of monolithic polycarbonate, *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 1 (20) (2024) 73–83. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-1-73-83
- [19] **N.A. Gasanova**, Influence of the temperature on the character of the deformation of plastics working in oil-field equipment, *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk [Current issues in the humanities and natural sciences]*, 5–3 (2017) 17–20.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitry A. PEZIN – *Industrial University of Tyumen.*

E-mail: pezinda@tyuiu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1223-2453>

Boris S. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ermakov55@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0932-2408>

Daniil V. NECHAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

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

Поступила: 05.11.2025; Одобрена: 26.11.2025; Принята: 28.11.2025.

Submitted: 05.11.2025; Approved: 26.11.2025; Accepted: 28.11.2025.

Научная статья

УДК 620.193

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31411>



С.А. Блинов, А.М. Левитский ✉, *О.Г. Зотов, Н.А. Голубков*

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

✉ levitskij_am@spbstu.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕДНОГО И АЛЮМИНИЕВОГО ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

Аннотация. В работе были проведены сравнительные испытания покрытий, нанесенных на СтЗсп методом холодного газодинамического напыления (ХГДН). В работе использовали установку «Димет-405». В качестве материала для напыления выбрали готовые смеси фирмы «Димет»: медная С-01-01, алюминиевая с добавлением цинка А-80-13. После нанесения образцы подверглись механическим и коррозионным испытаниям в камере соляного тумана и контейнерах с морской водой. Оценку коррозионной стойкости покрытий проводили по изменению веса образцов, что также позволило рассчитать скорость коррозии. Полученные результаты были подтверждены металлографическим анализом и визуальным контролем. Наибольшую коррозионную устойчивость продемонстрировало покрытие из смеси алюминия и цинка. Окисления основного металла образца замечено не было. Устойчивость к растрескиванию при изгибе также выше у покрытия на основе алюминия и цинка.

Ключевые слова: коррозия, медь, алюминий, ХГДН, коррозионностойкое покрытие.

Для цитирования:

Блинов С.А., Левитский А.М., Зотов О.Г., Голубков Н.А. Сравнительные испытания коррозионной стойкости медного и алюминиевого порошковых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 4. С. 146–158. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31411>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31411>*S.A. Blinov, A.M. Levitsky* ✉, *O.G. Zotov, N.A. Golubkov*

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

✉ levitskij_am@spbstu.ru

COMPARATIVE CORROSION RESISTANCE TESTS OF COPPER AND ALUMINUM POWDER COATINGS APPLIED BY COLD GAS DYNAMIC SPRAYING

Abstract. The study conducted comparative tests of coatings deposited on St3sp steel using Cold Gas Dynamic Spraying (CGDS) method. The experiments were carried out using a “Dimet-405” system. Ready-made powder mixtures from “Dimet” were chosen as the material for spraying: copper C-01-01 and aluminum with the addition of zinc A-80-13. After deposition, the samples were subjected to mechanical and corrosion tests in a salt spray chamber and in containers with seawater. The corrosion resistance of the coatings was assessed by measuring the change in the weight of the samples, which also allowed for the calculation of the corrosion rate. The results were confirmed by metallographic analysis and visual inspection. The coating made of a mixture of aluminum and zinc demonstrated the highest corrosion resistance. No oxidation of the base metal of the sample was observed. The resistance to cracking during bending was also higher for aluminum–zinc based coatings.

Keywords: corrosion, copper, aluminium, Cold Gas Dynamic Spraying, corrosion-resistant coating.

Citation:

Blinov S.A., Levitsky A.M., Zotov O.G., Golubkov N.A., Comparative corrosion resistance tests of copper and aluminum powder coatings applied by cold gas dynamic spraying, *Global Energy*, 31 (04) (2025) 146–158, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31411>

Введение. Одним из основных способов защиты различных узлов и механизмов от коррозионного воздействия является нанесение защитных покрытий.

Первым упоминаниям о подобных способах защиты материала более 1000 лет. При этом наиболее предпочтительными являются методы, не оказывающие термического влияния на основной материал, что позволяет сохранить его исходные свойства. Одним из таких способов является холодное газодинамическое напыление (ХГДН).

В основе метода лежит эффект, основанный на развитии большой кинетической энергии частицы. При ударе о подложку частица прилипает к ней без оплавления [1–8]. В ходе напыления существуют различные варианты взаимодействия частицы с подложкой: эрозионный износ материала подложки, внедрение и деформация частицы с последующим формированием адгезионного контакта на поверхности. На рис. 1 показана принципиальная схема такого взаимодействия между частицами меди и подложкой из алюминия [9–12]. По итогу получается беспористое и сплошное покрытие. В работе [13] показаны результаты математического моделирования соударения различных материалов методом молекулярной динамики.

На сегодняшний день актуальным вопросом является применение технологии ХГДН при нанесении антикоррозионных покрытий. В связи с этим в нашей работе были исследованы коррозионные и механические свойства типовых порошковых смесей для нанесения покрытий по этой технологии.

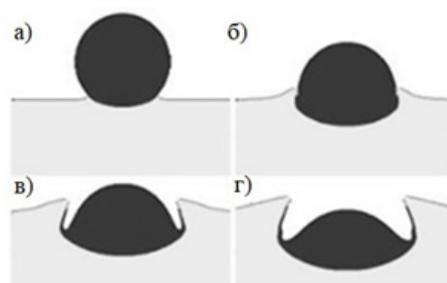


Рис. 1. Схема взаимодействия медной частицы с алюминиевой подложкой при напылении методом ХГДН:
 а) эрозионный износ материала подложки; б) внедрение без деформации частицы;
 в) внедрение и деформация частицы; г) формирование адгезионного контакта на поверхности

Fig. 1. Schematic diagram of the interaction between a copper particle and an aluminum substrate during deposition by the Cold Gas Dynamic Spraying (CGDS) method: a) erosive wear of the substrate material; b) particle embedding without deformation; c) particle embedding and deformation; d) formation of an adhesive contact on the surface

Материалы и методика

Исследования проводились на образцах стали марки Ст3сп 100×20×3 мм. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали Ст3сп

Table 1

Chemical composition of St3sp steel

Содержание элементов, масс. %							
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
0,164	0,210	0,405	0,003	0,005	0,030	0,039	0,012

Для нанесения покрытий использовали установку ХГДН низкого давления «Димет-405», так как напыляемые металлы обладают высокой пластичностью (рис. 2).

В работе рассмотрены два вида покрытий:

- 1) медное, для него использовался порошок С-01-01, состоящий из медного порошка с добавлением корунда;
- 2) алюминиевое, для него взята смесь А-80-13, в ее составе порошок основа – алюминий, добавка в виде цинка и корунда.

Добавление в смесь для ХГДН частиц карбида кремния SiC или же корунда Al₂O₃ активирует поверхность подложки, повышает адгезионные свойства и позволяет получить более плотное и сплошное покрытие [14–16].

Также для использованных в исследовании смесей были определены технологические характеристики. Морфологию частиц определили на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Supra 40VP, применив метод съемки во вторичных электронах. Для определения гранулометрического состава использовали лазерный анализатор размера частиц Fritsch Analysette 22 NanoTec plus.

Нанесение покрытий осуществлялось вручную для приближения к реальным условиям использования подобной установки. Стальные пластины при помощи установки «Димет-405»



Рис. 2. Установка холодного газодинамического напыления с низким давлением «Димет-405»

Fig. 2. Low-pressure CGDS unit “Dimet-405”

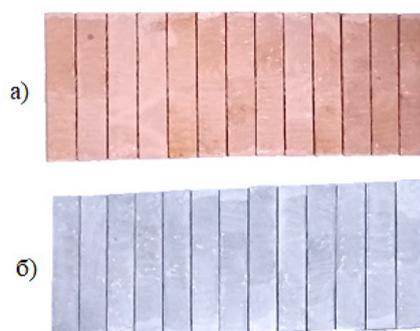


Рис. 3. Общий вид образцов после нанесения:

а) образцы из Ст3 + ХГДН С-01-01; б) образцы из Ст3 + ХГДН А-80-13

Fig. 3. General view of the manufactured samples after deposition:

а) steel samples + CGDS C-01-01; б) steel samples + CGDS A-80-13

были подвергнуты абразивной обработке порошком электрокорунда к-00-04-02. Это процедура позволяет получить необходимую шероховатость, что обеспечивает улучшение адгезии. Для нанесения покрытий была выбрана температура 440°C. Полученные образцы представлены на рис. 3.

Проводились коррозионные испытания в камере соляного тумана, в морской воде, а также циклическое испытание «туман – воздух». Продолжительность каждого из испытаний составила 720 часов. После испытаний проводился визуальный контроль и взвешивание образцов для определения скорости коррозии. Расчет проводился исходя из данных об изменении массы образцов в ходе испытаний по следующей формуле:

$$r'_{corr} = \frac{\Delta m}{A \cdot \rho \cdot t'}$$

где r'_{corr} – скорость коррозии, мкм/год; ρ – плотность металла, г/см³; Δm – изменение массы, г; A – площадь поверхности, м²; t' – время выдержки, годы.

Испытание на трехточечный изгиб проводилось на испытательной машине Zwick/Roell Z100. Испытание продолжалось до тех пор, пока в покрытии не образовывалось трещин. В этот момент фиксировался угол изгиба.

Металлографическое исследование стальных пластин с коррозионностойкими покрытиями проводилось на оптическом микроскопе Leica DMI 5000. На шлифах проводилось измерение толщины покрытия.

Анализ результатов

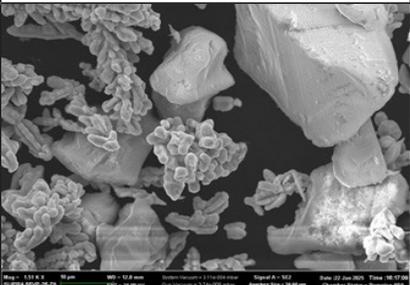
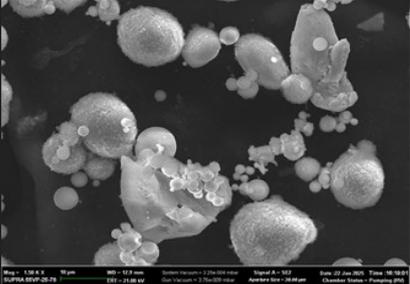
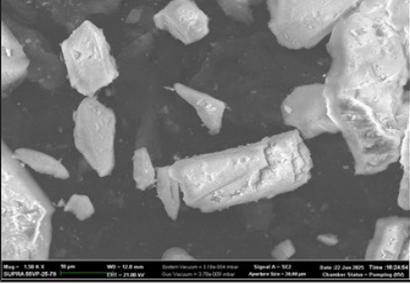
Результаты исследований морфологии и гранулометрического состава приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Морфология частиц (увеличение x1,5К)

Table 2

Morphology of particles (1.5K magnification)

Название порошка	Фото частиц	Форма частиц
С-01-01		Дендритная (частицы меди) / осколочная (частицы корунда)
А-80-13		Сферическая (частицы алюминия и цинка) / осколочная (частицы корунда)
К-00-04-02		Осколочная (частицы корунда)

Основная фракция во всех исследованных порошках – 40–60 мкм, а форма частиц различна. Следовательно, можно предположить, что при создании порошковых смесей для нанесения покрытий методом ХГДН следует уделять внимание основной фракции смеси, в то время как форма частиц, по-видимому, не играет существенной роли.

В табл. 4 приведены результаты испытаний на трехточечный изгиб.

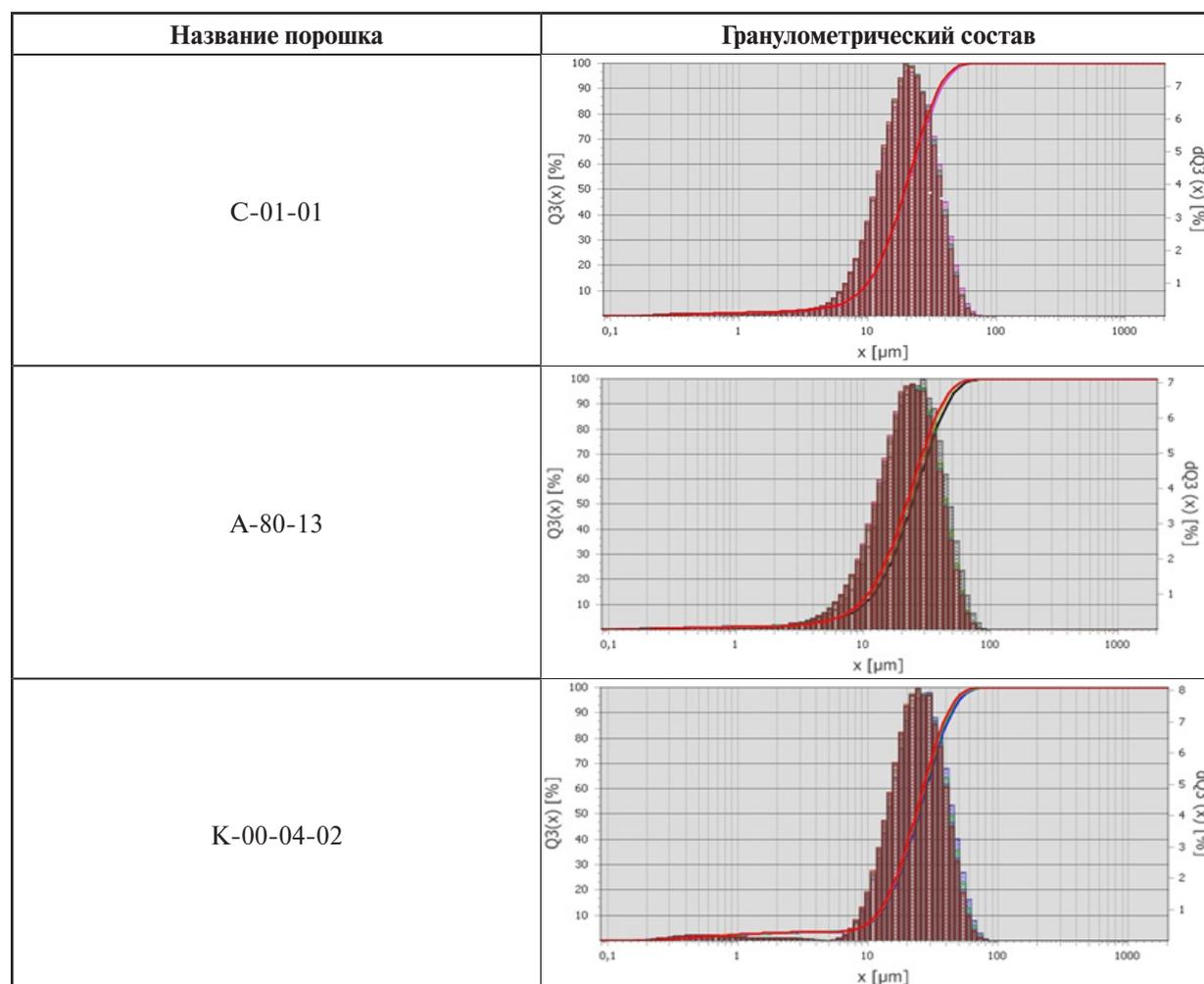
Видно, что покрытие на основе смеси алюминия и цинка показало большую устойчивость к трещинообразованию при трехточечном изгибе, нежели покрытие на основе меди. Хотя медь и является одним из самых пластичных металлов, существует вероятность, что выбранная температура нанесения не обеспечивает формирование высоких пластических свойств для покрытия на основе меди.

Таблица 3

Гранулометрический состав порошков

Table 3

Granulometric composition of powders



На рис. 4 показан внешний вид образцов после коррозионных испытаний в сравнении с видом образцов, хранившихся в эксикаторе. Скорости коррозии показаны в табл. 5.

Исходя из полученных данных следует, что покрытие на основе алюминия и цинка показало лучшую по сравнению с покрытием на основе меди коррозионную стойкость во всех видах испытаний. Об этом можно судить по дефектности покрытия и по количеству оксидов железа характерного коричнево-оранжевого цвета. На образцах с медным покрытием заметно большое количество участков именно такого цвета, в то время как на образцах с алюминиево-цинковым покрытием таких участков значительно меньше. При этом вычисленные скорости коррозии говорят, что образцы с медным покрытием в некоторых случаях прокорродировали меньше.

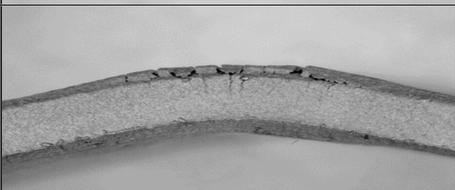
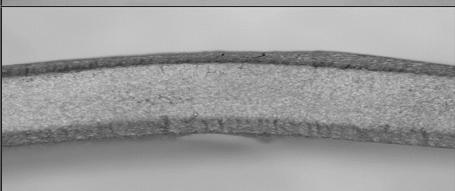
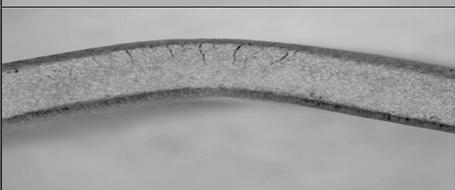
В табл. 6 показаны фотографии структуры покрытий образцов из эксикатора, а также образцов после коррозионных испытаний. Аналогичные фотографии для алюминиевого покрытия показаны в табл. 7.

Таблица 4

Вид образцов после проведения механических испытаний

Table 4

Samples after mechanical testing

Материал покрытия	Вид трещин на покрытии	Угол загиба, °	Толщина покрытия, мкм
С-01-01		19	135
		9	199
		13	127
		9	87
А-80-13		38	216
		19	232
		36	50
		20	189,5

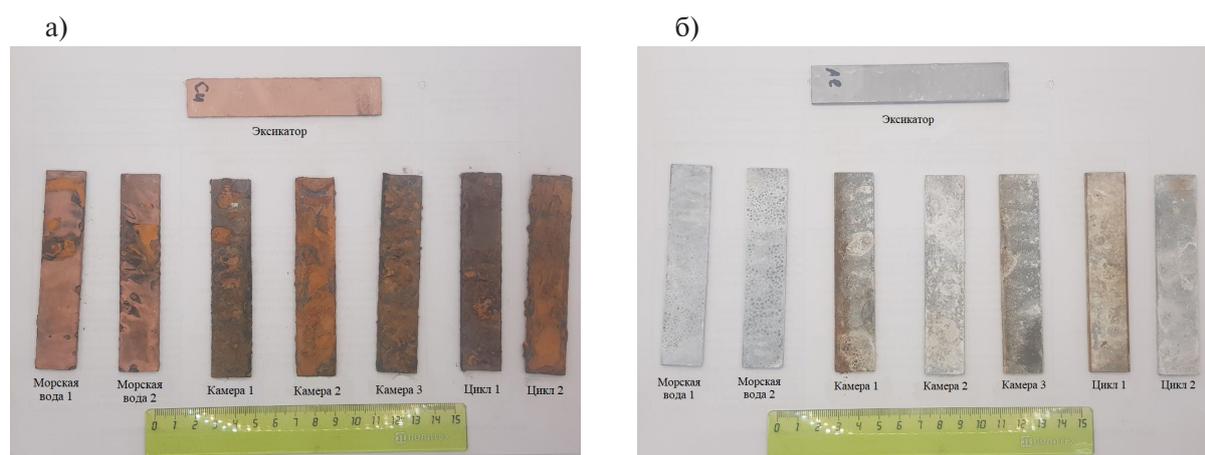


Рис. 4. Общий вид образцов после коррозионных испытаний:
а) образцы Ст3 + ХГДН С-01-01; б) образцы Ст3 + ХГДН А-80-13

Fig. 4. General view of the samples after corrosion testing:
a) steel samples + CGDS C-01-01; b) steel samples + CGDS A-80-13

Таблица 5

Скорости коррозии в условиях коррозионных испытаний

Table 5

Corrosion rates under corrosion testing conditions

№ п/п	Тип покрытия	Скорость коррозии, мм/год		
		Соляной туман	Морская вода	Циклическое
1	Cu	0,0053	0,0860	0,0293
2		0,1206	0,2762	0,0182
3		0,0112	—	—
4	Al	0,1334	0,1235	0,0772
5		0,1514	0,1458	0,0832
6		0,1011	—	—

Металлографическое исследование показало, что покрытие на основе алюминия и цинка лучше прилегает к подложке. После испытаний дефектов на границе с основным металлом не обнаружено. В то время как на образцах с медным покрытием заметно, развитое в разной степени, расслоение покрытия и основного металла.

Обсуждение

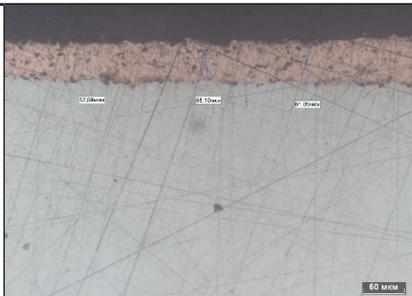
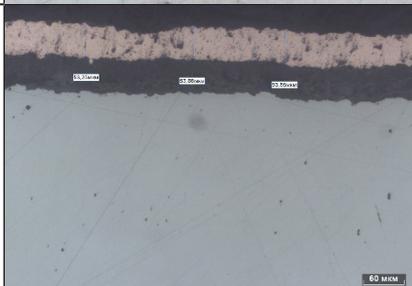
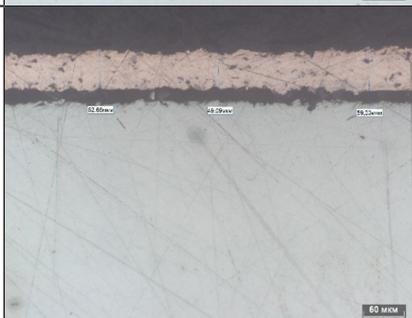
Актуальным является вопрос определения скорости коррозии. Данный параметр является важным при планировании срока службы различных конструкций. Определение скорости коррозии по изменению массы образца содержит ряд сложностей. В процессе испытания имеют место следующие явления: окисление материала покрытия, частичное растворение покрытия, взаимодействие основного металла с реагентом в местах повреждения покрытия, сопровождающееся осаждением продуктов взаимодействия на образец. Существующие методики предусматривают удаление продуктов коррозии щеткой перед взвешиванием, однако не все окислы возможно удалить таким способом, а при более активной обработке поверхности существует риск снять неповрежденный материал. Это обстоятельство указывает на необходимость

Таблица 6

Образцы с медным покрытием

Table 6

Copper coated samples

<p>Исходный образец</p>		<p>Средняя толщина слоя покрытия составила 56,08 мкм.</p>
<p>Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана</p>		<p>Средняя толщина слоя покрытия составила 53,65 мкм. Под покрытием обнаружен слой окислов, что говорит о наличии в нем сквозных дефектов.</p>
<p>Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»</p>		<p>Средняя толщина слоя покрытия составила 132,11 мкм. Под покрытием обнаружен слой окислов, что говорит о наличии в нем сквозных дефектов.</p>
<p>Испытание в морской воде</p>		<p>Средняя толщина слоя покрытия составила 53,66 мкм. Под покрытием присутствует равномерный слой окислов. Причина его образования – несплошности в покрытии.</p>

доработки существующих методик или разработки альтернативных для получения более точных расчетных скоростей коррозии. В частности, перспективным выглядит сочетание ускоренных коррозионных испытаний с электрохимическими методами исследования [17].

Заключение

В результате проведенных коррозионных испытаний на стальных пластинах, покрытых смесью из алюминия и цинка, не обнаружено окислов основного металла.

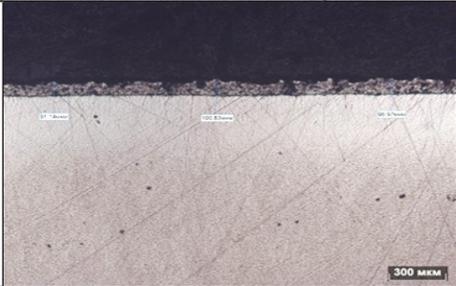
Установлено, что на образцах, покрытых медью, очаги коррозии основного металла появились менее чем через 96 часов с начала испытаний. На это оказали влияние следующие факторы:

Таблица 7

Образцы с алюминиевым покрытием

Table 7

Aluminum coated samples

Исходный образец		Средняя толщина слоя покрытия составила 164,14 мкм. Покрытие нанесено равномерно.
Испытания при воздействии нейтрального соляного тумана		Средняя толщина слоя покрытия составила 125,25 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к основному материалу.
Циклические испытания «нейтральный соляной туман – воздух»		Средняя толщина слоя покрытия составила 196,19 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Несплошностей в покрытии нет. Покрытие плотно прилегает к стали.
Испытание в морской воде		Средняя толщина слоя покрытия составила 91,02 мкм. Заметно небольшое истончение покрытия. Сквозных дефектов в покрытии нет. Адгезия покрытия и основного материала хорошая.

1) алюминий и цинк служат протекторами, то есть их электрохимические потенциалы ниже, чем у железа, что обуславливает их растворение в процессе электрохимической коррозии взамен стали;

2) металлографическое исследование показало, что при ручном нанесении алюминиево-цинковая смесь ложится на сталь более равномерно, чем смесь из меди. Соответственно покрытие получается более сплошным и беспористым.

Помимо превосходства в коррозионной стойкости покрытие на основе алюминия и цинка показало лучшие пластические свойства. Трещины в покрытии на основе меди образовывались при среднем угле изгиба $12,5^\circ$ против $28,3^\circ$ у покрытия на основе алюминия и цинка. Низкая пластичность покрытия на основе меди предположительно связана с неверным выбором температуры нанесения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Reshetniak V., Reshetniak O., Aborkin A., Nederkin V., Filippov A.** Effect of the Interface on the Compressibility of Substances with Spherical Nano-Inhomogeneities on the Example of Al/C₆₀, *Nanomaterials*, 12 (12) (2022) 2045. DOI: 10.3390/nano12122045
- [2] **Aborkin A., Babin D., Belyaev L., Bokaryov D.** Enhancing the Microhardness of Coatings Produced by Cold Gas Dynamic Spraying through Multi-Reinforcement with Aluminum Powders Containing Fullerenes and Aluminum Nitride, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 7 (6) (2023) 203. DOI: 10.3390/jmmp7060203
- [3] **Adaan-Nyiak M.A., Tiamiyu A.A.** Recent advances on bonding mechanism in cold spray process: A review of single-particle impact methods, *Journal of Materials Research*, 38 (2023) 69–95. DOI: 10.1557/s43578-022-00764-2
- [4] **Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М.** Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
- [5] **Алхимов А.П., Гулидов А.И., Косарев В.Ф., Нестерович Н.И.** Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // *Прикладная механика и техническая физика*. 2000. Т. 41, № 1. С. 204–209.
- [6] **Ghelichi R., Bagherifard S., Guagliano M., Verani M.** Numerical simulation of cold spray coating, *Surface and Coatings Technology*, 205 (23–24) (2011) P. 5294–5301. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.038
- [7] **Assadi H., Gärtner F., Stoltenhoff T., Kreye H.** Bonding mechanism in cold gas spraying, *Acta Materialia*, 51 (15) (2003) 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X
- [8] **King P.C., Bae G., Zahiri S.H., Jahedi M., Lee C.** An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates, *Journal of Thermal Spray Technology*, 19 (2010) 620–634. DOI: 10.1007/s11666-009-9454-7
- [9] **King P., Vucko M., Poole A.J., Jahedi M., de Nys R.** Cold spray antifouling of marine seismic streamers. Режим доступа: <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP124574&dsid=DS1> (дата обращения: 07.03.2020).
- [10] **Vucko M.J., King P.C., Poole A.J., Carl C., Jahedi M.Z., de Nys R.** Cold spray metal embedment: an innovative antifouling technology, *Biofouling*, 28 (3) (2012) 239–248. DOI: 10.1080/08927014.2012.670849
- [11] **Moridi A., Hassani-Gangaraj S.M., Guagliano M.** A hybrid approach to determine critical and erosion velocities in the cold spray process, *Applied Surface Science*, 273 (2013) 617–624. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.089
- [12] **Козлов И.А., Лещев К.А., Никифоров А.А., Демин С.А.** Холодное газодинамическое напыление покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. Т. 90, № 8. С. 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
- [13] **Белай О.В., Киселев С.П., Киселев В.П.** Численное моделирование методом молекулярной динамики соударения наночастицы с преградой в условиях холодного газодинамического напыления // *Прикладная механика и техническая физика*. 2023. Т. 64, № 6 (382), С. 27–35. DOI: 10.15372/PMTF202315303
- [14] **Schmidt T., Assadi H., Gärtner F., Richter H., Stoltenhoff T., Kreye H., Klassen T.** From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (2009) 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7
- [15] **Prusov E.S., Deev V.B., Shurkin P.K., Arakelian S.M.** The effect of alloying elements on the interaction of boron carbide with aluminum melt, *Non-ferrous Metals*, 1 (2021) 27–33. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.04
- [16] **Aborkin A.V., Babin D.M., Elkin A.I., Ryabkova V.V.** Microhardness of gas-dynamic coatings from aluminum powder multi-reinforced with fullerenes and aluminum oxide, *Non-ferrous Metals*, 2 (2024) 52–57. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.08

[17] Козлов И.А., Никифоров А.А., Демин С.А., Вдовин А.И. Использование металлопорошковой композиции системы цинк–алюминий для нанесения защитного покрытия методом холодного газодинамического напыления. Труды ВИАМ. 2022. Т. 7, № 113. С. 89–98. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЛИНОВ Святослав Алексеевич – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

ЛЕВИТСКИЙ Алексей Максимович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

ЗОТОВ Олег Геннадьевич – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: zog-58@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3243-4359>

ГОЛУБКОВ Никита Александрович – ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: golubkov-na@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

REFERENCES

[1] V. Reshetniak, O. Reshetniak, A. Aborkin, V. Nederkin, A. Filippov, Effect of the Interface on the Compressibility of Substances with Spherical Nano-Inhomogeneities on the Example of Al/C60, Nanomaterials, 12 (12) (2022) 2045. DOI: 10.3390/nano12122045

[2] A. Aborkin, D. Babin, L. Belyaev, D. Bokaryov, Enhancing the Microhardness of Coatings Produced by Cold Gas Dynamic Spraying through Multi-Reinforcement with Aluminum Powders Containing Fullerenes and Aluminum Nitride, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 7 (6) (2023) 203. DOI: 10.3390/jmmp7060203

[3] M.A. Adaan-Nyiaq, A.A. Tihamiyu, Recent advances on bonding mechanism in cold spray process: A review of single-particle impact methods, Journal of Materials Research, 38 (2023) 69–95. DOI: 10.1557/s43578-022-00764-2

[4] A.P. Alkhimov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, V.M. Fomin, Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie. Teoriia i praktika [Cold Gas Spraying: Theory and Practice]. Moscow: Fizmatlit, 2010. 536 p.

[5] A.P. Alkhimov, A.I. Gulidov, V.F. Kosarev, N.I. Nesterovich, Osobennosti deformirovaniia mikrochas-tits pri udare o tverduiu pregradu [Features of microparticle deformation upon impact with a solid barrier], Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaiia fizika [Applied mechanics and technical physics], 41 (1) (2000) 204–209.

[6] R. Ghelichi, S. Bagherifard, M. Guagliano, M. Verani, Numerical simulation of cold spray coating, Surface and Coatings Technology, 205 (23–24) (2011) P. 5294–5301. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.05.038

[7] H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye, Bonding mechanism in cold gas spraying, Acta Materialia, 51 (15) (2003) 4379–4394. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X

- [8] P.C. King, G. Bae, S.H. Zahiri, M. Jahedi, C. Lee, An experimental and finite element study of cold spray copper impact onto two aluminum substrates, *Journal of Thermal Spray Technology*, 19 (2010) 620–634. DOI: 10.1007/s11666-009-9454-7
- [9] P. King, M. Vucko, A.J. Poole, M. Jahedi, R. de Nys, Cold spray antifouling of marine seismic streamers, <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP124574&dsid=DS1>. Accessed October 28, 2025.
- [10] M.J. Vucko, P.C. King, A.J. Poole, C. Carl, M.Z. Jahedi, R. de Nys, Cold spray metal embedment: an innovative antifouling technology, *Biofouling*, 28 (3) (2012) 239–248. DOI: 10.1080/08927014.2012.670849
- [11] A. Moridi, S.M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano, A hybrid approach to determine critical and erosion velocities in the cold spray process, *Applied Surface Science*, 273 (2013) 617–624. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.02.089
- [12] I.A. Kozlov, K.A. Leshchev, A.A. Nikiforov, S.A. Demin, Cold Spray Coatings (review), *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*, 90 (8) (2020) 77–93. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
- [13] O.V. Belai, S.P. Kiselev, V.P. Kiselev, Numerical simulation of a nanoparticle collision with a target by the molecular dynamics method under the conditions of cold gas-dynamic spraying, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 64 (6), 27–35. DOI: 10.15372/PMTF202315303
- [14] T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner, H. Richter, T. Stoltenhoff, H. Kreye, T. Klassen, From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (2009) 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7
- [15] E.S. Prusov, V.B. Deev, P.K. Shurkin, S.M. Arakelian, The effect of alloying elements on the interaction of boron carbide with aluminum melt, *Non-ferrous Metals*, 1 (2021) 27–33. DOI: 10.17580/nfm.2021.01.04
- [16] A.V. Aborkin, D.M. Babin, A.I. Elkin, V.V. Ryabkova, Microhardness of gas-dynamic coatings from aluminum powder multi-reinforced with fullerenes and aluminum oxide, *Non-ferrous Metals*, 2 (2024) 52–57. DOI: 10.17580/nfm.2024.02.08
- [17] I.A. Kozlov, A.A. Nikiforov, S.A. Dyomin, A.I. Vdovin, Use of metal powder composition of the zinc–aluminum system for application of a protective coating by the method of cold gas-dynamic spraying, *Trudy VIAM (Proceedings of VIAM)*, 7 (113) (2022) 89–98. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-89-98

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sviatoslav A. BLINOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: blinov_sa@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2017-8249>

Alexey M. LEVITSKY – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: levitskij_am@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7900-4007>

Oleg G. ZOTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: zog-58@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3243-4359>

Nikita A. GOLUBKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: golubkov-na@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6785-1444>

Поступила: 22.09.2025; Одобрена: 27.10.2025; Принята: 27.10.2025.

Submitted: 22.09.2025; Approved: 27.10.2025; Accepted: 27.10.2025.