

Том 31, №2, 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: 30.06.2025

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2025

31 (2) 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: 30.06.2025

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2025

Содержание

Энергетика. Электротехника

Калашников А.М., Райковский Н.А., Жуков А.О. Исследование характеристик несмазываемого компрессора роторно-пластинчатого типа с новой конструктивной схемой.....	7
Кочеткова Е.Ю., Лебедева А.А., Миневич Т.Г., Модулина А.Н. Расчет индуктивности рассеяния лобовой части обмотки асинхронизированного синхронного генератора (АСГ) на основе метода скалярного потенциала.....	18
Бусаров С.С., Юша В.Л. Анализ температурных режимов комбинированных многоступенчатых компрессорных агрегатов на базе винтовых маслозаполненных и поршневых тихоходных длинноходовых компрессоров.....	29
Мозжегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Углеродный след энергетической установки на основе твердооксидного топливного элемента.....	42
Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов, потерь и индуктивности рассеяния в стержневой обмотке якоря с косвенным охлаждением электрической машины переменного тока на основе спрямленной модели.....	57
Крафт В.Е., Джайасингхе Б.М.Д.Н.С., Борисова М.Э., Ваганов Г.В. Накопление и релаксация заряда в пленочных и волокнистых полиимидах.....	70
Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Результаты вариантного расчета магнитного поля, токов, потерь и индуктивности рассеяния в стержневой обмотке якоря с косвенным охлаждением электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки.....	85

Металлургия. Материаловедение

Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А. Формирование переходных слоев в мультиматериальных изделиях из сплавов Inconel 718 и Ti6Al4V методом селективного лазерного плавления.....	97
Кравцов Д.Р., Арсентьева К.С., Мамутов В.С., Степанов А.А. Комбинированные испытания для определения механических свойств биметалла «Ковар-Медь».....	114
Красиков А.В., Меркулова М.В., Старицын М.В. Свойства и технологические особенности электроосаждения покрытий Ni-P-W.....	125

Лучшие практики

Могучев А.И., Карачурина Р.Ф., Габидуллина Э.В. Формирование и освоение компетенций, востребованных рынком: опыт УГНТУ.....	136
Богданов Д.В. НОЦ «Газпромнефть-Политех» – вклад в науку и образование.....	144

Contents

Energetics. Electrical engineering

Kalashnikov A.M., Raykovsky N.A., Zhukov A.O. Investigation of the characteristics of an oil-free rotary-vane compressor with a new design scheme.....	7
Kochetkova E.Y., Lebedeva A.A., Minevich T.G., Modulina A.N. Calculation of the leakage inductance of the winding end part of an asynchronized synchronous generator (ASG) based on the scalar potential method.....	18
Busarov S.S, Yusha V.L. Analysis of temperature conditions of combined multi-stage compressor units based on screw oil-filled and piston low-speed long-stroke compressors.....	29
Mozzhegorova Yu.V., Ilinykh G.V., Korotaev V.N. Carbon footprint of a solid oxide fuel cell power plant.....	42
Kadi-Ogly E.F., Korovkin N.V. Calculation method for magnetic field, currents, losses, and leakage reactance in the bar-type armature winding of indirectly cooled ac electrical machine based on straighten model.....	57
Kraft V.E., Jayasinghe N., Borisova M.E., Vaganov G.V. Charge accumulation and relaxation in film and fibrous polyimides.....	70
Kadi-Ogly E.F., Korovkin N.V. Results of variant calculations of magnetic field, currents, losses, and leakage reactance in the bar-type armature winding of indirectly cooled AC electrical machine based on field-circuit formulation.....	85

Metallurgy. Material Science

Repnin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A. Formation of transition layers in multi-material Inconel 718 and Ti6Al4V alloy products obtained by selective laser melting.....	97
Kravtsov D.R., Arsenyeva X.S., Mamutov V.S., Stepanov A.A. Combined tests for determination of mechanical properties of Kovar-Copper bimetal.....	114
Krasikov A.V., Merkulova M.V., Staritsyn M.V. Properties of Ni-P-W coatings and technological features of their electrodeposition.....	125

Best practices

Moguchev A.I., Karachurina R.F., Gabidullina E.V. Developing market-relevant competencies: USPTU case study.....	136
Bogdanov D.V. Gazpromneft-Polytech Research & Education Center – advancing science and knowledge.....	144

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.514

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31201>



А.М. Калашников¹ ✉, Н.А. Райковский¹, А.О. Жуков²

¹ Омский государственный технический университет, Омск, Россия;

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ kalashnikov_omgtu@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСМАЗЫВАЕМОГО КОМПРЕССОРА РОТОРНО-ПЛАСТИНЧАТОГО ТИПА С НОВОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СХемой

Аннотация. В данной работе выполнены сравнительные теоретические исследования влияния конструктивных и режимных параметров на характеристики несмазываемого роторно-пластинчатого компрессора с традиционной и новой конструктивными схемами. Представлена основная система расчетных уравнений для проведения исследований. В результате установлено, что при частоте вращения ротора несмазываемой компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа от 1000 до 2000 об/мин для рассмотренных вариантов конструктивных схем не обеспечиваются высокие значения коэффициента; традиционное исполнение несмазываемого компрессора роторно-пластинчатого типа не позволяет обеспечить высокие значения эффективного КПД (более 70%). При этом применение новой конструктивной схемы в несмазываемом роторно-пластинчатом компрессоре позволяет обеспечить значения эффективного КПД при частоте вращения ротора менее 3000 об/мин. С учетом принятых условий, а именно: $\lambda \geq 0,8$ и $\eta_{\text{эф}} \geq 0,75$ – можно разработать следующие рекомендации по проектированию: обеспечивать частоту вращения ротора $n = 3000$ об/мин, радиус цилиндра $R_{\text{ц}} \geq 0,075$ м.

Ключевые слова: роторно-пластинчатый компрессор, новая конструктивная схема, метод, теоретические исследования, энергетические характеристики.

Для цитирования:

Калашников А.М., Райковский Н.А., Жуков А.О. Исследование характеристик несмазываемого компрессора роторно-пластинчатого типа с новой конструктивной схемой // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31201>



*A.M. Kalashnikov*¹ ✉, *N.A. Raykovsky*¹, *A.O. Zhukov*²

¹ Omsk State Technical University, Omsk, Russia;

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

✉ kalashnikov_omgtu@mail.ru

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF AN OIL-FREE ROTARY-VANE COMPRESSOR WITH A NEW DESIGN SCHEME

Abstract. In this paper, comparative theoretical studies of the influence of design and operating parameters on the characteristics of an oil-free rotary-vane compressor with traditional and new design scheme are performed. The main system of calculation equations for conducting research is presented. As a result of the theoretical study, it was found that at a rotor speed of an oil-free rotary-vane compressor stage from 1000 rpm to 2000 rpm for the considered variants of design schemes, high values of the coefficient are not provided. The traditional design of an oil-free rotary-vane compressor does not allow for high values of effective energy conversion efficiency (more than 70%). At the same time, the use of a new design scheme in an oil-free rotary-vane compressor makes allows for effective efficiency values at a rotor speed of less than 3000 rpm. Based on the given conditions, namely: $\lambda \geq 0,8$ and $\eta_{\text{eff}} \geq 0,75$, the following design recommendations can be made: ensure the rotor speed $n = 3000$ rpm, cylinder radius $R_c \geq 0,075$ m.

Keywords: rotary-vane compressor, new design scheme, method, theoretical studies, energy characteristics.

Citation:

Kalashnikov A.M., Raykovsky N.A., Zhukov A.O., Investigation of the characteristics of an oil-free rotary-vane compressor with a new design scheme, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 7–17, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31201>

Введение. Роторно-пластинчатые компрессоры широко применяются в промышленности. В России компрессоры производятся только двумя предприятиями (НПО «Искра» – для сжатия низконапорных углеводородных газов; ООО «ТЕХПРОМ-Н» – для сжатия воздуха) исключительно со смазываемой рабочей камерой. За рубежом данная технология компримирования газов получила широкое распространение как в смазываемом, так и в несмазываемом исполнении. Среди основных производителей можно отметить такие компании, как Ing. Enea Mattei (Италия), Marper (Испания), Ro-Flo Compressors (США), DVP (Италия), Becker (Германия), Hydrovane (Англия), Torad Engineering (США), Elmo Rietschle (Германия), Wittig (Германия).

Анализ литературы [1–6] показал, что повышение энергетических характеристик и расширение диапазона рабочих параметров несмазываемых роторно-пластинчатых компрессоров является актуальным направлением совершенствования данного класса машин. Причем главным фактором повышения энергетических характеристик пластинчатых компрессоров является снижение потерь мощности на трение [7].

В работах [8, 9] предложена новая конструктивная схема компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа и выполнены исследования, подтверждающие возможность существенного снижения потерь мощности на трение в сравнении с традиционным исполнением компрессора.

Целью данной работы является проведение сравнительных теоретических исследований интегральных энергетических характеристик несмазываемого роторно-пластинчатого компрессора, выполненного в двух вариантах: с традиционной и новой конструктивными схемами.

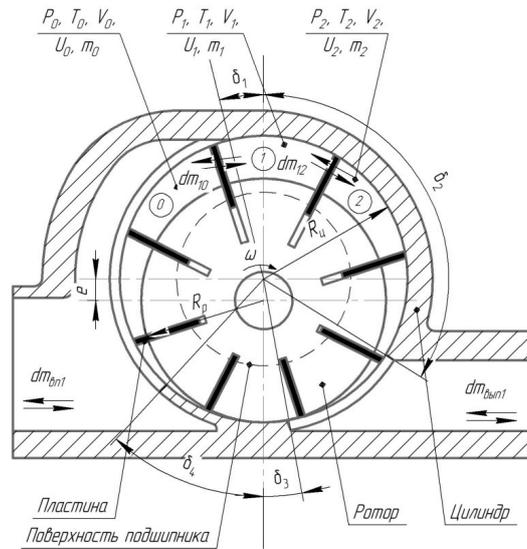


Рис. 1. Расчетная схема для определения термодинамических характеристик рабочего процесса

Fig. 1. Calculation scheme for determining the thermodynamic characteristics of the working process

Математическая модель

Особенности предложенной конструктивной схемы, реализующей уменьшение потерь мощности на трение в компрессоре, рассмотрены в работе [9], расчетные схемы представлены на рис. 1, 2. Подробное описание схем представлено в статьях [8–10].

На рис. 1 представлена расчетная схема определения термодинамических характеристик рабочего процесса, содержащая n рабочих ячеек, с параметрами газа P_1, V_1, T_1, U_1, m_1 в рабочей ячейке; P_2, V_2, T_2, U_2, m_2 в опережающей ячейке; и P_0, V_0, T_0, U_0, m_0 в опаздывающей ячейке. Рабочая ячейка сообщается с полостями всасывания и нагнетания через окна газораспределения, в которых происходит массообмен при процессах наполнения и выхлопа ($dm_{вп1}, dm_{вып1}$), также существует массообмен между рабочей и опережающей ячейками ($dm_{1,2}$), между рабочей и опаздывающей ячейками ($dm_{1,0}$), через зазоры между пластиной и крышками цилиндра и между пластинами и ротором. Процессы, протекающие в рабочей ячейке, характерны и для всех n ячеек.

Зависимости изменения термодинамических параметров газа в рабочей ячейке несмазываемой ступени роторно-пластинчатого типа от угла поворота ротора, установленные в ходе математических преобразований, определяются следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\varphi} = -(k-1) \frac{T}{V} \cdot \frac{dV}{d\varphi} + (k-1) \cdot \frac{T}{m \cdot \omega} \cdot \sum \dot{m}_{\text{вт}} + \frac{1}{m \cdot \omega} \cdot \sum (k \cdot T_i - T) \cdot \dot{m}_{\text{пр}}; \\ \frac{dp}{d\varphi} = -k \cdot \frac{p}{V} \cdot \frac{dV}{d\varphi} + \frac{p}{m \cdot \omega} \cdot (k \cdot \sum \dot{m}_{\text{вт}} + \sum \dot{m}_{\text{пр}}) + \frac{R}{V \cdot \omega} \cdot \sum (k \cdot T_i - T) \cdot \dot{m}_{\text{пр}}; \\ \frac{dm}{d\varphi} = \frac{\dot{m}}{\omega}; \\ \frac{dV}{d\varphi} = -R_{\text{ц}} \cdot e \cdot L \cdot \left[\frac{e}{R_{\text{ц}}} \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(2\varphi) + 2 \cdot \sin(\beta/2) \cdot \sin(\varphi) \right]; \\ \frac{dL}{d\varphi} = p \cdot \frac{dV}{d\varphi}. \end{cases} \quad (1)$$

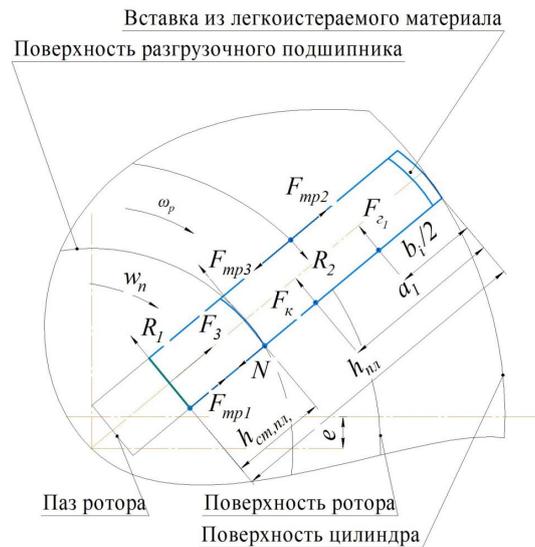


Рис. 2. Принципиальная схема сил, действующих на уплотнительную пластину компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа, реализующего новую конструктивную схему

Fig. 2. Scheme of the forces acting on the sealing plate of a compressor stage of the rotary-vane type, implementing a new design scheme

Силы реакции, действующие со стороны пластины на элементы конструкции рабочей камеры компрессора роторно-пластинчатого типа с новой конструктивной схемой, определяются следующими выражениями:

$$R_1 = \frac{m_{\text{п}} \cdot a_{\text{п}}(\varphi) - F_{\text{ц}} - F_{\text{r}2}}{2 \cdot f \cdot \mu} + \frac{(1 - \mu \cdot \mu \cdot f)}{2 \cdot f \cdot \mu} \cdot N + \frac{n}{2} \cdot F_{\text{r}1} + \frac{\delta}{2} \cdot F_{\kappa};$$

$$R_2 = \left[\frac{(1 + \mu \cdot \mu \cdot f)}{2 \cdot f \cdot \mu} \right] \cdot N - \frac{n}{2} \cdot F_{\text{r}1} + \frac{m_{\text{п}} \cdot a_{\text{п}}(\varphi) - F_{\text{ц}} - F_{\text{r}2}}{2 \cdot f \cdot \mu} - \frac{\delta}{2} \cdot F_{\kappa};$$

$$N = \left[\frac{\rho(\varphi) - R_{\text{п}} - h_{\text{пл}}}{R_{\text{п}} \cdot \mu + \mu \cdot \rho(\varphi) - h_{\text{пл}} \cdot \mu + \frac{R_{\text{п}} - \rho(\varphi) + h_{\text{пл}}}{f \cdot \mu} - 2 \cdot \mu \cdot \rho_{\text{п}}(\varphi)} \right] \cdot \left[\frac{m_{\text{п}} \cdot a_{\text{п}}(\varphi) - F_{\text{ц}} - F_{\text{r}2}}{f \cdot \mu} \right] +$$

$$+ \left[\frac{R_{\text{п}} - \rho(\varphi)}{R_{\text{п}} \cdot \mu + \mu \cdot \rho(\varphi) - h_{\text{пл}} \cdot \mu + \frac{R_{\text{п}} - \rho(\varphi) + h_{\text{пл}}}{f \cdot \mu} - 2 \cdot \mu \cdot \rho_{\text{п}}(\varphi)} \right] \cdot \delta \cdot F_{\kappa} -$$

$$- \left[\frac{h_{\text{пл}}}{R_{\text{п}} \cdot \mu + \mu \cdot \rho(\varphi) - h_{\text{пл}} \cdot \mu + \frac{R_{\text{п}} - \rho(\varphi) + h_{\text{пл}}}{f \cdot \mu} - 2 \cdot \mu \cdot \rho_{\text{п}}(\varphi)} \right] \cdot n \cdot F_{\text{r}1}.$$

$$f = \begin{cases} +1, & \text{если } 0 \leq \varphi \leq 180 \\ -1, & \text{если } 180 < \varphi < 360, \end{cases}$$

$$\delta = \begin{cases} +1, & \text{если } 0 < \varphi < 180 \\ 0, & \text{если } \varphi = 0, \varphi = 180, \\ -1, & \text{если } 180 < \varphi < 360 \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} -1, & \text{если } p_2 > p_1 \\ 0, & \text{если } p_2 = p_1. \\ +1, & \text{если } p_1 > p_2 \end{cases}$$

Более подробно разработанная математическая модель несмазываемого роторно-пластинчатого компрессора с новой конструктивной схемой рассмотрена в работе [8], с традиционной конструктивной схемой – в работах [9, 10].

Исходные данные для проведения расчетно-параметрического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные

Table 1

Initial data

Наименование	Значение	Ед. изм.
Длина цилиндра, L	200	мм
Радиус цилиндра, $R_{\text{ц}}$	100	мм
Эксцентриситет, e	10	мм
Число пластин, z	8	шт.
Односторонний торцевой зазор, $h_{\text{тор}}$	0,2	мм
Среднее значение коэффициента трения, μ	0,2	–
Давление всасывания, $P_{\text{вс}}$	0,1	МПа
Температура всасывания, $T_{\text{вс}}$	293	К
Давление нагнетания, $P_{\text{н}}$	0,3	МПа
Толщина пластины, b	5	мм
Высота пластины, $h_{\text{пл}}$	40	мм
Высота выступа пластины, $h_{\text{ст.пл}}$	20	мм
Частота вращения ротора, n	3000	об/мин
Материал пластины	АГ-1500 СО5	–

Результаты исследований

Для разработки рекомендаций по проектированию было введено условно эталонное значение эффективного КПД. В качестве эталонного значения эффективного КПД принят эффективный КПД конкурентной спиральной технологии, равный 75% [11]. В качестве эталонного значения коэффициента подачи принято значение, равное 0,8 [11, 12].

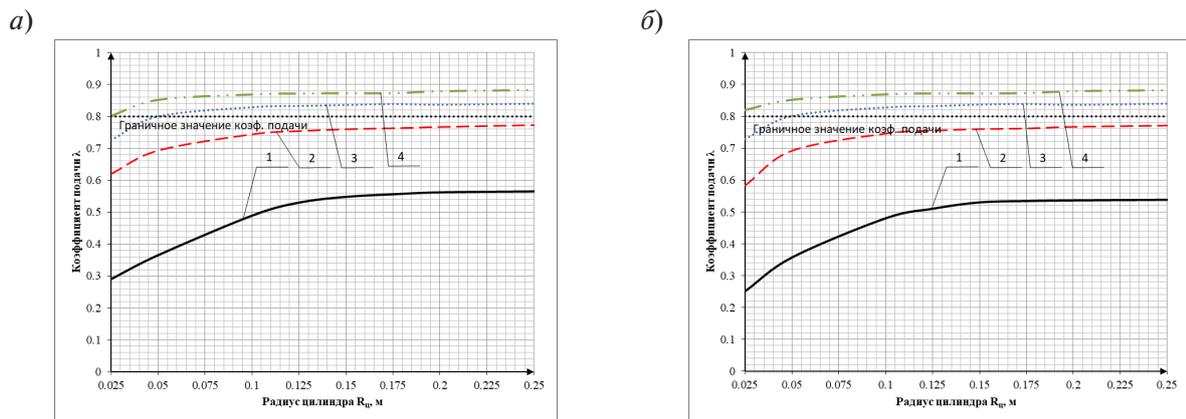


Рис. 3. Зависимость коэффициента подачи несмазываемой компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа от радиуса цилиндра: *a* – традиционная конструктивная схема; *b* – новая конструктивная схема; 1 – 1000 об/мин; 2 – 2000 об/мин; 3 – 3000 об/мин; 4 – 4000 об/мин

Fig. 3. Dependence of the supply coefficient of an oil-free rotary-vane compressor stage on the cylinder radius: *a* – traditional design scheme; *b* – new design scheme; 1 – 1000 rpm; 2 – 2000 rpm; 3 – 3000 rpm; 4 – 4000 rpm

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента подачи несмазываемого компрессора роторно-пластинчатого типа от радиуса цилиндра для традиционной (*a*) и новой (*b*) конструктивных схем.

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 3, показал, что с увеличением радиуса цилиндра до определенного значения коэффициент подачи возрастает, дальнейшее же увеличение радиуса цилиндра не приводит к значимому изменению величины коэффициента подачи. С увеличением частоты вращения ротора значение радиуса цилиндра, при котором величина коэффициента подачи остается постоянной, смещается в область малых значений: например, при $n = 1000$ об/мин $R_{ц} = 0,15$ м, а при $n = 4000$ об/мин $R_{ц} = 0,075$ м.

При частоте вращения ротора более 3000 об/мин и радиусе цилиндра более 0,05 м коэффициент подачи $\lambda \geq 0,8$. При малых частотах вращения ротора ($n \leq 1000$ об/мин) и радиусах цилиндра ($R_{ц} \leq 0,025$) коэффициент подачи компрессора $\lambda \leq 0,3$.

Таким образом, при частотах вращения ротора менее 2000 об/мин коэффициент подачи принимает неприемлемо малые значения, поэтому в дальнейшем область частот вращения ротора менее 2000 об/мин рассматриваться в ходе теоретических исследований не будет.

На рис. 4 представлены зависимости механического КПД несмазываемого компрессора роторно-пластинчатого типа от радиуса цилиндра для традиционной (*a*) и новой (*b*) конструктивных схем.

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 4, показал, что с увеличением радиуса цилиндра:

- для традиционной конструктивной схемы компрессора во всем диапазоне значений радиуса цилиндра механический КПД уменьшается, при этом в рассматриваемом диапазоне режимных и конструктивных параметров механический КПД находится в диапазоне 10÷70%. Малые значения механического КПД соответствуют быстроходным машинам, имеющим большие значения радиуса цилиндра. В среднем в рассмотренном диапазоне параметров значения механического КПД несмазываемой компрессорной ступени принадлежат диапазону 35÷40%, что соответствует результатам исследования других авторов [13–15];

- для нового исполнения компрессорной ступени с увеличением радиуса цилиндра механический КПД увеличивается, при этом в рассматриваемом диапазоне режимных и конструктивных параметров механический КПД находится в диапазоне от 0,7 до 0,9. Большие значения

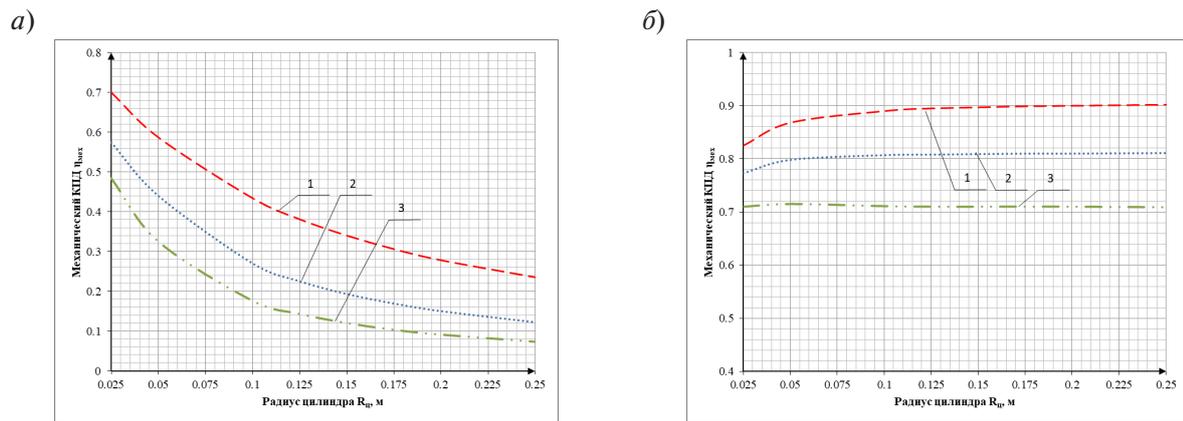


Рис. 4. Зависимость механического КПД несмазываемой компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа от радиуса цилиндра: *a* – традиционная конструктивная схема; *б* – новая конструктивная схема; 1 – 2000 об/мин; 2 – 3000 об/мин; 3 – 4000 об/мин

Fig. 4. Dependence of the mechanical efficiency of an oil-free rotary-vane compressor stage on the cylinder radius: *a* – traditional design scheme; *b* – new design scheme; 1 – 2000 rpm; 2 – 3000 rpm; 3 – 4000 rpm

механического КПД соответствуют меньшим частотам вращения ротора и большим значениям радиуса цилиндра. В среднем в рассмотренном диапазоне параметров значения механического КПД равны 80%.

На рис. 5 представлены зависимости эффективного КПД несмазываемого компрессора роторно-пластинчатого типа от радиуса цилиндра для традиционной (*a*) и новой (*б*) конструктивных схем.

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 5, показал, что с увеличением радиуса цилиндра:

- для традиционной конструктивной схемы компрессора во всем диапазоне значений радиуса цилиндра эффективный КПД уменьшается, при этом в рассматриваемом диапазоне режимных и конструктивных параметров эффективный КПД находится в диапазоне 8÷60%. Меньшие значения эффективного КПД соответствуют быстроходным машинам, имеющим большие значения радиуса цилиндра. В среднем в рассмотренном диапазоне параметров значения эффективного КПД несмазываемого компрессора принадлежат диапазону 30÷40%;

- для новой конструктивной схемы с увеличением радиуса цилиндра эффективный КПД увеличивается, при этом в рассматриваемом диапазоне режимных и конструктивных параметров эффективный КПД находится в диапазоне 60÷85%. Большие значения эффективного КПД соответствуют компрессорам, имеющим большие значения радиуса цилиндра. В среднем в рассмотренном диапазоне параметров значения эффективного КПД несмазываемого компрессора принадлежат диапазону 75÷80%.

В целом, с увеличением быстроходности наблюдается увеличение коэффициента подачи и уменьшение эффективного КПД.

Заключение

В результате проведенного теоретического исследования установлено, что при частоте вращения ротора несмазываемой компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа от 1000 об/мин до 2000 об/мин для рассмотренных вариантов конструктивных схем не обеспечиваются высокие значения коэффициента; традиционное исполнение несмазываемого компрессора роторно-пластинчатого типа не позволяет обеспечить высокие значения эффективного КПД (более 70%). При этом применение новой конструктивной схемы в несмазываемом роторно-пластинчатом

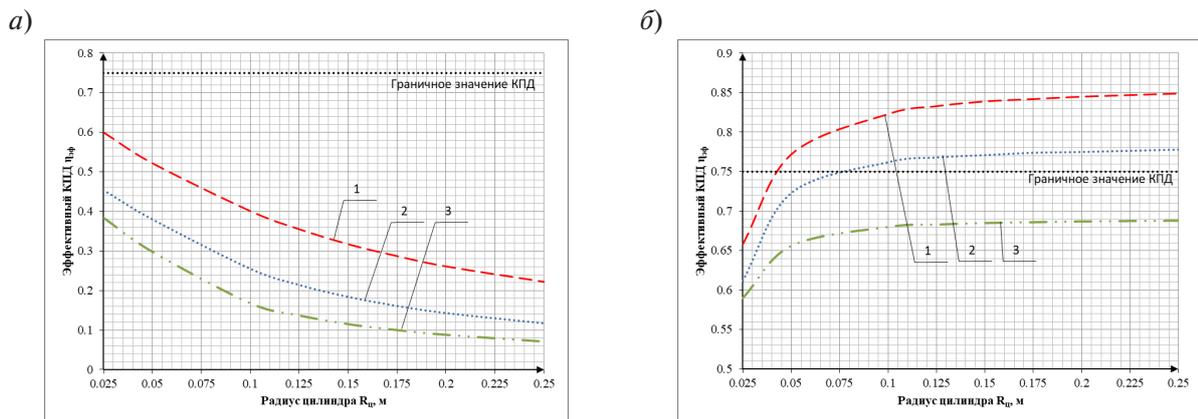


Рис. 5. Зависимость эффективного КПД несмазываемой компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа от радиуса цилиндра: *a* – традиционная конструктивная схема; *б* – новая конструктивная схема; 1 – 2000 об/мин; 2 – 3000 об/мин; 3 – 4000 об/мин

Fig. 5. Dependence of the effective efficiency of an oil-free rotary-vane compressor stage on the cylinder radius: *a* – traditional design scheme; *b* – new design scheme; 1 – 2000 rpm; 2 – 3000 rpm; 3 – 4000 rpm

компрессоре позволяет обеспечить значения эффективного КПД при частоте вращения ротора менее 3000 об/мин.

С учетом принятых условий, а именно: $\lambda \geq 0,8$ и $\eta_{\text{эф}} \geq 0,75$ – можно разработать следующие рекомендации по проектированию: обеспечивать частоту вращения ротора $n = 3000$ об/мин, радиус цилиндра $R_{\text{ц}} \geq 0,075$ м.

Список обозначений

- δ, f, n – единичные функции;
- λ – коэффициент подачи;
- μ – коэффициент трения между;
- ρ – перемещение пластины;
- φ – угол поворота ротора;
- ω – угловая скорость вращения ротора (ячейки);
- a_1 – центр масс пластины;
- $a_{\text{п}}$ – ускорение пластины;
- b_i – размер выступающей из ротора части пластины;
- $F_{\text{ц}}$ – центробежная сила;
- $F_{\text{г}}$ – газовая сила;
- $F_{\text{тр}}$ – сила трения;
- $h_{\text{пл}}$ – высота пластины;
- k – коэффициент адиабаты;
- L – работа сжатия;
- m – масса газа в ячейке;
- \dot{m} – массовый расход между рассматриваемой рабочей ячейкой и смежными ячейками;
- $m_{\text{п}}$ – масса пластины;
- $\dot{m}_{\text{пр}}$ – массовый расход притечек газа в рабочую ячейку;
- $\dot{m}_{\text{ут}}$ – массовый расход утечек газа из рабочей ячейки;
- N – сила реакции, действующая со стороны разгрузочных подшипников;
- n – частота вращения;
- p – давление газа в рабочей ячейке;

T – температура газа в рабочей ячейке;
 T_i – температура попадающего из соседней ячейки газа;
 R – газовая постоянная;
 R_1 и R_2 – силы реакции, действующие со стороны паза ротора;
 R_p – радиус ротора;
 V – рабочий объем ячейки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Bianchi G., Cipollone R.** Theoretical modeling and experimental investigations for the improvement of the mechanical efficiency in sliding vane rotary compressors // *Applied Energy*. 2015. Vol. 142. P. 95–107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.055
- [2] **Gu H., Chen Y., Wu J., Jiang Y., Sundén B.** Impact of discharge port configurations on the performance of sliding vane rotary compressors with a rotating cylinder // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 186. Art. no. 116526. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116526
- [3] **Gu H., Ye F., Chen Y., Wu J., Li W., Sundén B.** Performance investigation and design optimization of novel rotating-cylinder sliding vane rotary compressors // *International Journal of Refrigeration*. 2022. Vol. 142. P. 137–147. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.06.009
- [4] **He D., Ye K., Yuan J., Li S., Xu S.** Prediction of inlet gas volume fraction of rotary vane pump under variable operational conditions with 1DCNN-TL model utilizing vibration signals // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2024. Vol. 110. Art. no. 109588. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109588
- [5] **Ye F., Bianchi G., Rane S., Tassou S.A., Deng J.** Numerical methodology and CFD simulations of a rotary vane energy recovery device for seawater reverse osmosis desalination systems // *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 190. Art. no. 116788. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116788
- [6] **Choo W.C., Ooi K.T.** Analysis of the novel multi-vane Revolving Vane compressor – Investigation of vane chattering phenomenon through instantaneous working chamber pressure measurements // *International Journal of Refrigeration*. 2022. Vol. 134. P. 207–218. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.020
- [7] **Bianchi G., Cipollone R.** Friction power modeling and measurements in sliding vane rotary compressors // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 84. P. 276–285. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.080
- [8] **Raykovskiy N.A., Chernov G.I., Evdokimov V.S., Kalashnikov A.M., Sadvakasov D.Kh.** Power loss analysis in a new oil-free rotary vane compressor: Experimental investigation and mathematical modeling // *International Journal of Refrigeration*. 2024. Vol. 160. P. 298–311. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2024.01.027
- [9] **Райковский Н.А., Калашников А.М.** Экспериментальное исследование энергетической эффективности новой трибологической схемы несмазываемой компрессорной ступени роторно-пластинчатого типа // *Компрессорное оборудование и ГТУ для газотранспортной системы*. 2023. С. 72–81.
- [10] **Райковский Н.А., Чернов Г.И., Калашников А.М.** Математическое моделирование роторно-пластинчатых компрессоров с учетом взаимного влияния трибологических и режимных параметров // *Трение и износ*. 2023. Т. 44, № 2. С. 167–179. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-167-179
- [11] **Ибрагимов Е.Р.** Повышение эффективности спирального компрессора сухого сжатия: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2009. 13 с.
- [12] **Борисенко А.В.** Разработка и исследование роторного холодильного компрессора с секторными поршнями: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2021. 13 с.
- [13] **Heng K.R., Ooi K.T., Chan W.K.** Experimental study of an oil-free swing vane compressor // *International Journal of Refrigeration*. 2022. Vol. 134. P. 95–104. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.028
- [14] **Aradau D., Costiuc L.** Friction power in sliding vane type rotary compressors // *International Compressor Engineering Conference*. 1996. Art. no. 1357.
- [15] **Головинцов А.Г., Румянцев В.А., Ардашев В.И. и др.** Ротационные компрессоры. Москва: Машиностроение, 1964. 315 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛАШНИКОВ Александр Михайлович – старший преподаватель, Омский государственный технический университет, без степени.

E-mail: kalashnikov_omgtu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6847-4937>

РАЙКОВСКИЙ Николай Анатольевич – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.

E-mail: n_raykovskiy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2783-8298>

ЖУКОВ Александр Олегович – профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, д-р техн. наук.

E-mail: ulun2015@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5122-3752>

REFERENCES

- [1] **G. Bianchi, R. Cipollone**, Theoretical modeling and experimental investigations for the improvement of the mechanical efficiency in sliding vane rotary compressors, *Applied Energy*, 142 (2015) 95–107. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.12.055
- [2] **H. Gu, Y. Chen, J. Wu, Y. Jiang, B. Sundén**, Impact of discharge port configurations on the performance of sliding vane rotary compressors with a rotating cylinder, *Applied Thermal Engineering*, 186 (2021) 116526. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116526
- [3] **H. Gu, F. Ye, Y. Chen, J. Wu, W. Li, B. Sundén**, Performance investigation and design optimization of novel rotating-cylinder sliding vane rotary compressors, *International Journal of Refrigeration*, 142 (2022) 137–147. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.06.009
- [4] **D. He, K. Ye, J. Yuan, S. Li, S. Xu**, Prediction of inlet gas volume fraction of rotary vane pump under variable operational conditions with 1DCNN-TL model utilizing vibration signals, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 110 (2024) 109588. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109588
- [5] **F. Ye, G. Bianchi, S. Rane, S.A. Tassou, J. Deng**, Numerical methodology and CFD simulations of a rotary vane energy recovery device for seawater reverse osmosis desalination systems, *Applied Thermal Engineering*, 190 (2021) 116788. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116788
- [6] **W.C. Choo, K.T. Ooi**, Analysis of the novel multi-vane Revolving Vane compressor – Investigation of vane chattering phenomenon through instantaneous working chamber pressure measurements, *International Journal of Refrigeration*, 134 (2022) 207–218. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.020
- [7] **G. Bianchi, R. Cipollone**, Friction power modeling and measurements in sliding vane rotary compressors, *Applied Thermal Engineering*, 84 (2015) 276–285. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.080
- [8] **N.A. Raykovskiy, G.I. Chernov, V.S. Evdokimov, A.M. Kalashnikov, D.Kh. Sadvakasov**, Power loss analysis in a new oil-free rotary vane compressor: Experimental investigation and mathematical modeling, *International Journal of Refrigeration*, 160 (2024) 298–311. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2024.01.027
- [9] **N.A. Raykovskiy, A.M. Kalashnikov**, Experimental study of energy efficiency of a new tribological scheme for an oil-free rotary vane compressor stage, *Kompessornoe oborudovanie i GTU dlia gazotransportnoi sistemy [Compressor equipment and gas turbine units for gas transportation systems]*, (2023) 72–81.
- [10] **N.A. Raykovskiy, G.I. Chernov, A.M. Kalashnikov**, Matematicheskoe modelirovanie rotorno-plastinchatykh kompressorov s uchetom vzaimnogo vliianiia tribologicheskikh i rezhimnykh parametrov [Mathematical modeling of rotary vane compressors taking into account the mutual influence of tribological and operating parameters], *Friction and Wear*, 44(2) (2023) 167–179. DOI: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-167-179

- [11] **E.R. Ibragimov**, Povyshenie effektivnosti spiral'nogo kompressora sukhogo szhatiia. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of a dry-compression scroll compressor. Cand. tech. sci. diss.], Kazan, 2009.
- [12] **A.V. Borisenko**, Razrabotka i issledovanie rotornogo kholodil'nogo kompressora s sektornymi porshniami. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of rotary refrigeration compressor with sector pistons. Cand. tech. sci. diss.], Kazan, 2021.
- [13] **K.R. Heng, K.T. Ooi, W.K. Chan**, Experimental study of an oil-free swing vane compressor, International Journal of Refrigeration, 134 (2022) 95–104. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.11.028
- [14] **D. Aradau, L. Costiuc**, Friction power in sliding vane type rotary compressors, International Compressor Engineering Conference, (1996) 1357.
- [15] **A.G. Golovintsov, V.A. Rumiantsev, V.I. Ardashev et al.**, Rotatsionnye kompressory [Rotary compressors], Mashinostroenie, Moscow, 1964.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr M. KALASHNIKOV – *Omsk State Technical University.*

E-mail: kalashnikov_omgtu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6847-4937>

Nikolai A. RAYKOVSKY – *Omsk State Technical University.*

E-mail: n_raykovskiy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2783-8298>

Aleksandr O. ZHUKOV – *Lomonosov Moscow State University.*

E-mail: ulun2015@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5122-3752>

Поступила: 25.11.2024; Одобрена: 19.01.2025; Принята: 22.01.2025.

Submitted: 25.11.2024; Approved: 19.01.2025; Accepted: 22.01.2025.

Научная статья

УДК 621.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>



Е.Ю. Кочеткова, А.А. Лебедева, Т.Г. Миневи́ч ✉, А.Н. Модулина

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

✉ minevich_tg@spbstu.ru

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ ЛОБОВОЙ ЧАСТИ ОБМОТКИ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА (АСГ) НА ОСНОВЕ МЕТОДА СКАЛЯРНОГО ПОТЕНЦИАЛА

Аннотация. Рассматривается построение трехмерной расчетной модели магнитного поля на основе замены вихревого поля токов потенциальным полем магнитных зарядов. Метод позволяет ввести в расчетной области, включая области, занятые током, обобщенный скалярный потенциал. Предложенный метод позволяет учитывать разнообразие и сложность конструкции электротехнического устройства, что показывает практический пример построения квазипотенциальной модели, содержащей различные виды фиктивных магнитных зарядов, заменяющих реальные токи. Модель сформирована для расчета магнитного поля, создаваемого секцией лобовой части обмотки асинхронизированного синхронного генератора. Численную реализацию задачи расчета магнитного поля предлагается выполнить вариационным способом с применением метода конечных элементов. Минимизация функционала осуществляется на множестве значений скалярного магнитного потенциала в узлах, являющихся вершинами объемных элементов. Результаты расчета магнитного поля предполагается использовать для дальнейшего расчета индуктивности рассеяния лобовых частей обмоток ротора.

Ключевые слова: магнитное поле, обобщенный скалярный потенциал, лобовая часть, асинхронизированный синхронный генератор, индуктивность рассеяния.

Для цитирования:

Кочеткова Е.Ю., Лебедева А.А., Миневи́ч Т.Г., Модулина А.Н. Расчет индуктивности рассеяния лобовой части обмотки асинхронизированного синхронного генератора (АСГ) на основе метода скалярного потенциала // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 18–28. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>*E.Y. Kochetkova, A.A. Lebedeva, T.G. Minevich* ✉, *A.N. Modulina*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ minevich_tg@spbstu.ru

CALCULATION OF THE LEAKAGE INDUCTANCE OF THE WINDING END PART OF AN ASYNCHRONIZED SYNCHRONOUS GENERATOR (ASG) BASED ON THE SCALAR POTENTIAL METHOD

Abstract. The construction of a three-dimensional calculation model of a magnetic field based on replacing the eddy field of currents with a potential field of magnetic charges is considered. The method allows introducing a generalized scalar potential in the calculation domain, including areas occupied by current. The proposed method allows taking into account the diversity and complexity of the design of an electrical device, which is shown by a practical example of constructing a quasi-potential model containing various types of fictitious magnetic charges replacing real currents. The model is formed to calculate the magnetic field generated by a section of the frontal part of the winding of an asynchronous synchronous generator. Numerical implementation of the problem of calculating the magnetic field is proposed to be performed by a variational method using the finite element method. Minimization of the functional is carried out on a set of values of the scalar magnetic potential at nodes that are vertices of volumetric elements. The results of the magnetic field calculation are supposed to be used for further calculation of the leakage inductance of the end parts of the rotor windings.

Keywords: magnetic field, generalized scalar potential, end part, asynchronous synchronous generator, leakage inductance.

Citation:

Kochetkova E.Y., Lebedeva A.A., Minevich T.G., Modulina A.N., Calculation of the leakage inductance of the winding end part of an asynchronous synchronous generator (ASG) based on the scalar potential method, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 18–28, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31202>

Введение. Значительное число электротехнических и электроэнергетических задач связано с исследованием электромагнитных полей. Разнообразие и сложность форм деталей конструкции современных электротехнических устройств, увеличение электромагнитных нагрузок, а также все более жесткие требования, предъявляемые к точности электромагнитных расчетов, приводят к необходимости трехмерной постановки задачи расчета электромагнитного поля для очень широкого круга проблем: определение параметров заземляющих устройств и создаваемых ими электромагнитных полей [1, 2], моделирование электромагнитного поля вокруг подземных кабелей [3], оптимизация толщины и формы экранов, ослабляющих внешнее магнитное поле [4], расчет магнитного поля электрической машины [5, 6], особенно в торцевой зоне электрической машины, где поле имеет трехмерный характер [7–11].

Теоретическое обоснование расчетного метода

Метод, который основан на применении обобщенного скалярного магнитного потенциала u_m , эффективен с точки зрения экономии вычислительного времени и требуемой памяти [12, 13]. Этот метод позволяет ввести в рассматриваемой области магнитного поля, включая

области, занятые токами, обобщенный скалярный потенциал u_m , что существенно уменьшает объем численных расчетов по сравнению, например, с методами, использующими векторный магнитный потенциал. В основе метода лежит эквивалентность поля линейных электрических токов и двойных слоев магнитных зарядов. Однако способ эквивалентной замены токов магнитными зарядами позволяет рассчитать поле вне зоны токов. Внутри зоны токов искомая напряженность магнитного поля \vec{H} представляется в виде суммы двух составляющих:

$$\vec{H} = \vec{H}_0 + \vec{H}_p,$$

где \vec{H}_0 – вихревая составляющая, $\vec{H}_p = -\text{grad } u_m$ – потенциальная составляющая.

Вектор \vec{H}_0 определяется по заданному распределению вектора плотности тока \vec{J} :

$$\text{rot } \vec{H}_0 = \vec{J}.$$

Задав \vec{H}_0 , рассчитывают объемные плотности ρ зарядов источников потенциального поля из условия $\text{div } \mu \vec{H} = 0$:

$$\text{div } \mu \vec{H}_p = -\text{div } \mu \vec{H}_0 = \rho,$$

где μ – магнитная проницаемость среды.

В некоторых точках, где имеют место разрывы \vec{H}_0 или μ и $\rho = \infty$, вводят в рассмотрение поверхностную дивергенцию, определяющую поверхностную плотность магнитных зарядов σ :

$$\text{div } \mu \vec{H}_0 = -\sigma.$$

Поверхностная дивергенция равна разности нормальных составляющих вектора индукции по обе стороны поверхности.

Задав источники потенциального поля, переходят к решению уравнения Пуассона относительно u_m :

$$\text{div } \mu \text{grad } u_m = -\rho - \sigma \delta_s,$$

где $\sigma \delta_s$ – обобщенная функция¹, называемая простым слоем на поверхности s с плотностью σ .

Решив уравнение Пуассона относительно u_m , затем вычисляют $\vec{H}_\Pi = -\text{grad } u_m$ и определяют искомое поле \vec{H} .

Реализация метода

Рассмотренный способ расчета магнитного поля путем представления его потенциальным полем магнитных зарядов может быть применен для решения актуальных практических задач, в частности – определения индуктивности рассеяния лобовой части обмотки электрической машины со специфическими конструкционными особенностями, а именно с большой длиной лобовой части обмотки. Примером такой машины может служить асинхронизированный синхронный генератор (АСГ). Данная задача требует рассматривать поле как трехмерное, поскольку конфигурация торцевой зоны и характер распределения магнитного поля весьма сложны. Лобовое рассеяние ввиду сложного пространственного расположения лобовых частей обмоток и влияния стали почти не поддается теоретическому расчету, что делает необходимыми разработку

¹ Владимиров В.С., Жаринов В.В. Уравнения математической физики. М: Физматлит, 2008. 400 с.

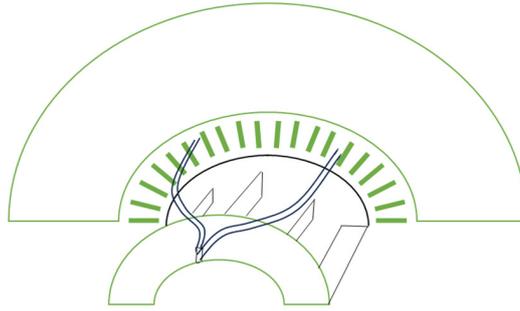


Рис. 1. Расчетная область торцевой зоны

Fig. 1. Calculated area of the end zone

и использование численного алгоритма расчета поля и индуктивности рассеяния лобовой части обмотки. Ее величина представляет собой существенный интерес при проектировании новых электрических машин. Определенное упрощение задачи может быть достигнуто благодаря конструктивным особенностям конкретной машины. Так, при расчете поля торцевой зоны АСГ, являющейся четырехполюсной машиной, допустимо разделить торцевую зону плоскостью симметрии, и тогда область расчета будет включать в себя половину торцевой зоны (рис. 1).

При формулировке граничных условий для скалярного магнитного потенциала особое внимание следует уделить поверхности, отделяющей активную зону машины от торцевой зоны, так как она несплошная из-за зазора между ротором и статором и, кроме того, она пересекается витками обмотки. Однако если зазор мал (в АСГ он не превышает 5 мм), то влиянием зазора можно пренебречь и считать граничную поверхность между активной и торцевой зонами сплошной. Поскольку материал статора и ротора ферромагнитный, то на этой границе скалярный магнитный потенциал принимает постоянное (нулевое) значение. Возмущение магнитного поля вблизи зубцов можно не учитывать, так как поле этого возмущения слабо сцепляется с витками роторной обмотки.

Чтобы рассчитать индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора, необходимо рассчитать элементарные потокосцепления взаимной индукции Ψ_{q1} с каждой секцией q от тока одной секции I . Таким образом, достаточно рассмотреть магнитное поле, создаваемое током одной секции обмотки. Пренебрежение эффектом насыщения стали при рассмотрении поля только одной секции не сказывается в данном случае на точности расчетов, поскольку даже при малых значениях магнитной проницаемости стали силовые линии практически перпендикулярны ферромагнитным поверхностям. Таким образом, если не интересоваться полем внутри стальных частей (что и имеет место при расчете индуктивности рассеяния обмотки, находящейся в воздухе), то с точки зрения граничных условий на поверхности стали насыщение стали не имеет значения.

Формирование расчетной модели при определении магнитного поля в торцевой зоне зависит от того, в какой форме будут представлены токоведущие части. Можно строить модель для спрямленной машины. Тем не менее учет конечного радиуса кривизны обмотки обеспечивает большую точность модели. Важным параметром, который учитывается при построении модели, является шаг обмотки, определяющий расстояние между активными сторонами секции. В рассматриваемой машине это расстояние достаточно велико (около 70 геометрических градусов), поэтому кривизна обмотки при построении модели должна быть учтена.

Построение расчетной модели секции основывается на замене ее витком, целиком расположенным в торцевой зоне. Такой подход соответствует методу зеркальных изображений. Считая

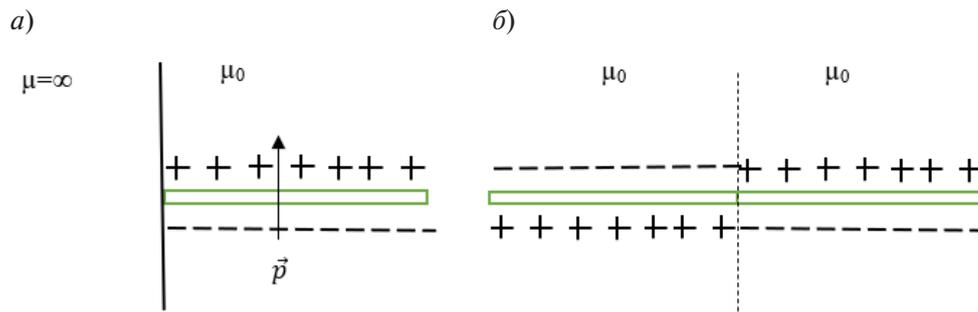


Рис. 2. Расчетная модель сечения (а) и ее представление в методе зеркальных изображений (б)
 Fig. 2. Computational model of the section (a) and its representation in the mirror image method (b)

в первом приближении виток бесконечно тонким, ток витка i можно заменить (рис. 2а) натянутым на виток двойным слоем зарядов [14, 15] с моментом

$$\vec{p} = \mu_0 i \vec{n},$$

где \vec{n} – вектор единичной к поверхности двойного слоя нормали.

Согласно методу зеркальных изображений, ферромагнитная среда ротора и статора заменяется на воздушную среду, в которой появляется зеркальное отражение витка: двойной слой магнитных зарядов противоположной полярности (рис. 2б). Как видно из рис. 2б, в области границы раздела сред имеет место компенсация зарядов реального витка и витка-отражения. Вследствие этого двойной слой зарядов, имитирующий виток, не соприкасается с поверхностью границы раздела, что позволяет задавать на поверхности однородное граничное условие I рода.

Для более точного расчета магнитного поля сечения обмотки ротора необходимо учитывать ее конечные размеры и достаточно сложную форму лобовой части сечения. Виток, заменяющий сечение, разделен на четыре составные части (рис. 3): 1 – верхний стержень, 2 – нижний стержень, 3 – соединительная часть (головка), 4 – токовая лента, бесконечно тонкая в осевом направлении, замыкающая ток витка. Учитывая конфигурацию стержней обмотки, для расчета поля \vec{H}_0 выбирается цилиндрическая система координат, ось z которой совпадает с осью машины.

Расчет составляющих вектора \vec{H}_0 для участков 1 и 2 (рис. 3) производится интегрированием вектора плотности тока витка \vec{J} от левой граничной поверхности верхнего стержня l_0 (рис. 4) в направлении $d\vec{l} = r \cdot \vec{e}_\phi d\phi$. При этом $H_0 = H_{0r}$. Поскольку участки 1 и 2 отличаются по координате r , то образуется теневая область поля вектора \vec{H}_0 . Для минимизации области, в которой $H_0 \neq 0$, на правых граничных поверхностях участков 1 и 2 вводятся фиктивные поверхностные токи [15]. На рис. 4 они показаны для участка 1 (для верхнего стержня): противоположный току витка добавочный ток плотности $\vec{j}_{d1} = H_{0r}$ и компенсирующий его ток плотности $\vec{j}_{k1} = -\vec{j}_{d1}$. Для участка 2 (для нижнего стержня) вводятся, соответственно, добавочный ток плотности \vec{j}_{d2} и компенсирующий его ток плотности $\vec{j}_{k2} = -\vec{j}_{d2}$. Поскольку $\frac{\partial H_0}{\partial r} = 0$, то объемный магнитный заряд в рассматриваемой области не образуется².

На верхней S_{v1} и нижней S_{n1} поверхностях стержня 1 (рис. 4) нормальная составляющая вектора \vec{H}_0 (обозначенная H_{0r}) претерпевает скачок, что ведет к появлению простых слоев заряда плотности $\sigma = \pm \mu_0 H_{0r}$ на указанных поверхностях. При расчете \vec{H}_0 в участке 3 (рис. 3)

² Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. СПб: Питер, 2003. 463 с.

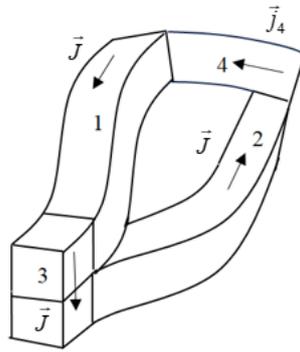


Рис. 3. Составные части витка: 1 – верхний стержень, 2 – нижний стержень, 3 – соединительная часть (головка), 4 – токовая лента, бесконечно тонкая в осевом направлении, замыкающая ток витка
 Fig. 3. Components of the coil: 1 – the upper rod, 2 – the lower rod, 3 – the connecting part (head), 4 – the current tape, infinitely thin in the axial direction, closing the current of the coil

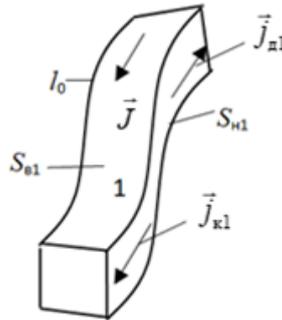


Рис. 4. Фиктивные поверхностные токи для верхнего стержня
 Fig. 4. Fictitious surface currents for the upper rod

с учетом направления вектора плотности тока $J = J_r$ (рис. 3) и направления интегрирования $d\vec{l} = r \cdot \vec{e}_\varphi d\varphi$ имеем $H_0 = H_{0z}$. Объемные заряды в участке 3 отсутствуют, поскольку $\frac{\partial H_0}{\partial z} = 0$, но на граничных поверхностях участка 3, перпендикулярных оси z , появятся простые слои зарядов плотностью $\sigma = \pm \mu_0 H_{0z}$. Для ограничения области, где составляющая H_{0z} отлична от нуля, по аналогии с участками 1 и 2, добавляются поверхностный ток плотности \vec{j}_{d3} и компенсирующий ток $\vec{j}_{k3} = -\vec{j}_{d3}$. На участке 4 ток витка замыкается посредством поверхностного тока плотности \vec{j}_4 (рис. 3). Поверхностные токи \vec{j}_{k1} , \vec{j}_{k2} , \vec{j}_{k3} и \vec{j}_4 заменяются двойными слоями магнитных зарядов, след поверхностей которых в сечении обмотки, перпендикулярном оси z , изображен на рис. 5а, а след в сечении, перпендикулярном оси r , – на рис. 5б.

Величина момента двойного слоя зарядов изменяется по линейному закону:

- на отрезке ab $p = \mu_0 j_{k1} (r - r_{01})$, где r_{01} – координата поверхности S_{n1} ;
- на отрезке cd $p = -\mu_0 j_{k2} (r - r_{02})$, где r_{02} – координата поверхности S_{n2} ;
- на отрезке ef $p = \mu_0 j_4 r (\varphi - \varphi_0)$, где φ_0 – координата левой поверхности нижнего стержня;
- на отрезке mn $p = -\mu_0 j_{k3} (z - z_0)$, где z_0 – координата граничной поверхности сечения.

На линиях bc и fm момент сохраняет постоянное значение: $p = \mu_0 i$, где i – ток сквозь сечение стержня.

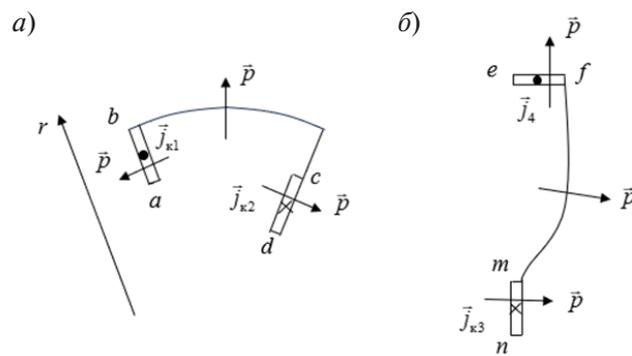


Рис. 5. Следы поверхностей двойных слоев магнитных зарядов в сечениях: перпендикулярном оси z (а), перпендикулярном оси r (б)

Fig. 5. Traces of surfaces of double layers of magnetic charges in sections: perpendicular to the z -axis (a), perpendicular to the r -axis (b)

Таким образом, построена квазипотенциальная модель магнитного поля торцевой зоны машины, создаваемого одной секцией обмотки. Компактное расположение магнитных зарядов в модели и отсутствие объемных зарядов являются ее достоинством и упрощают расчет магнитного поля и последующий расчет индуктивности рассеяния лобовой части обмотки.

Для численного решения уравнения Пуассона рекомендован метод конечных элементов, имеющий ряд достоинств: возможность аппроксимирования любой границы с высокой степенью точности; возможность варьирования размеров объемных элементов, что важно при расчете неоднородных полей; обеспечение автоматического выполнения условия непрерывности искомой величины и ее производных на поверхностях соседних элементов; возможность точного учета физических свойств среды (магнитная проницаемость, наличие заряда) в исследуемой области; возможность повышения точности решения за счет использования конечных элементов более высоких порядков, что имеет значение при исследовании полей в случае сильной неоднородности поля.

Цель расчета магнитного поля методом конечных элементов заключается в получении значений скалярного магнитного потенциала u_m , удовлетворяющих уравнению Пуассона, в узлах разбиения области расчета. Вариационный подход к решению уравнения Пуассона с граничными условиями Дирихле или Неймана состоит в нахождении минимума энергетического функционала $I(u_m)$ – интегральной величины, связанной с физическим процессом и пропорциональной энергии поля, заключенной в объеме расчетной области v [15]:

$$I(u_m) = \int_v 0,5 \hat{\mu} (\text{grad } u_m)^2 dv - \int_v \rho u_m dv - \int_v \sigma u_m ds,$$

где s – поверхность с поверхностной плотностью зарядов σ , $\hat{\mu}$ – тензор магнитной проницаемости среды.

Функционал достигает экстремума при совпадении потенциала u_m с решением уравнения Пуассона. Минимизация функционала осуществляется на множестве узловых значений потенциала.

Рассмотренная квазипотенциальная модель использовалась при расчете трехмерного стационарного магнитного поля в торцевой зоне АСГ и индуктивности рассеяния лобовой части отдельно взятой секции фазы обмотки. Индуктивность рассеяния, определенная в предположении, что витки весьма тонкие, хорошо согласуется с оценочным значением индуктивности, полученным по практическим методикам (0,3 мГн). Индуктивность, рассчитанная по результатам расчета

поля витка конечного размера, существенно меньше и составляет 0,09 мГн. Это позволяет сделать вывод о необходимости учета размеров сечения секции при расчете индуктивности рассеяния обмоток с определенными геометрическими особенностями (отношение размеров сечения к расстоянию между прямым и обратным стержнями секции превышает 0,1).

Заключение

Рассмотренный алгоритм расчета магнитного поля на основе скалярного магнитного потенциала и векторной функции тока дает возможность использовать расчетные модели магнитного поля, содержащие все типы магнитных зарядов (источников квазипотенциального магнитного поля) в задачах, отличающихся разнообразием геометрий расчетной области и пространственного распределения токов в ней. Данный подход позволяет учитывать нелинейные и анизотропные свойства среды, определять, наряду со скалярным магнитным потенциалом, и другие характеристики поля – напряженность, магнитные потоки, что важно при решении широкого круга практических задач, для реализации которых необходим расчет трехмерного магнитного поля.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Коровкин Н.В., Шишигин С.Л.** Расчетные методы в теории заземления // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. Т. 166, № 1. С. 74–79.
- [2] **Shneerson G.A., Shishigin S.L.** Features of the application of the virial theorem for magnetic systems with quasi-force-free windings, *Technical Physics*, 68 (2023) S595–S606. DOI: 10.1134/S1063784223900929
- [3] **Dubitsky S.D., Greshnyakov G.V., Korovkin N.V., Chesnokov E.A.** Electric strength test of a new and aged XPLE-insulated power cable: a Weibull statistic approach, 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (2022) 1163–1166. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755588
- [4] **Canova A., Freschi F., Giaccone L., Repetto M.** Optimal design of closed multilayer magnetic shields, 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – Italy (ACES), (2017) 1–2. DOI: 10.23919/ROPACES.2017.7916413
- [5] **Demenko A.** Finite element modeling of magnetic field in electrical machines: Scalar or vector potential formulation part I: Comparative description of methods, 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), (2016) 1–6. DOI: 10.1109/WZEE.2016.7800208
- [6] **Guo B., Djelloul-Khedda Z., Dubas F.** Nonlinear analytical solution in axial flux permanent magnet machines using scalar potential, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71 (4) (2024) 3383–3393. DOI: 10.1109/TIE.2023.3273247
- [7] **Bodrenkov E.A., Kochetkova E.Y., Lebedeva A.A., Modulina A.N.** Calculations of the magnetic fields of the end zone of the asynchronized synchronous generator (ASG) by the scalar potential method, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), (2021) 1245–1247. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396403
- [8] **Zheleznyak V.N., Burmistrov A.A., Korovkin N.V., Adalev A.S.** Simulation of operating condition of the equipment of the short-circuit generator package, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), (2024) 865–868. DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468512
- [9] **Jiang H.-C., He Y.-L., Tang G.-J., Xu M.-X.** A comprehensive analysis on transient electromagnetic force behavior of stator windings in turbo-generator, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018 (1) (2018) 189609. DOI: 10.1155/2018/4189609

[10] Lyamin A.A., Gulai S.L., Verkhovtsev D.A., Chishko S.D. Application of the method of visualization of polyharmonic vibration structures, Power Technology and Engineering, 54 (2021) 929–932. DOI: 10.1007/s10749-021-01308-0

[11] Roytgarts M., Smirnov A. Turbogenerator electromagnetic analysis with changing reactive load, 20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'22), 20 (2022) 434–437. DOI: 10.24084/repqj20.333

[12] Park J.O., Lee J.S., Park I.H. Magnetic Field analysis of electric current in coplanar coils using equivalent permanent magnetization and magnetic scalar potential, IEEE Access, 12 (2024) 27556–27565. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3354060

[13] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 22–34. DOI: 10.18721/JEST.30201

[14] Ishibashi K., Andjelic Z., Takahashi Y., Takamatsu T., Fukuzumi T., Wakao S. Magnetic field evaluation at vertex by boundary integral equation derived from scalar potential of double layer charge, IEEE Transactions on Magnetics, 48 (2) (2012) 459–462. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174777

[15] Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Расчет вихревых магнитных полей на основе использования скалярного магнитного потенциала // Электричество. 1982. № 1. С. 7–14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОЧЕТКОВА Елена Юрьевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: k_ey@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2807-4688>

ЛЕБЕДЕВА Алла Анатольевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: alla280318@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-1288>

МИНЕВИЧ Татьяна Геннадьевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: minevich_tg@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8137-2479>

МОДУЛИНА Александра Николаевна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: modulina@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8860-3022>

REFERENCES

[1] N.V. Korovkin, S.L. Shishigin, Calculation methods in the grounding theory, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics, 1 (166) (2013) 74–79.

[2] G.A. Shneerson, S.L. Shishigin, Features of the application of the virial theorem for magnetic systems with quasi-force-free windings, Technical Physics, 68 (2023) S595–S606. DOI: 10.1134/S1063784223900929

[3] S.D. Dubitsky, G.V. Greshnyakov, N.V. Korovkin, E.A. Chesnokov, Electric strength test of a new and aged XPLE-insulated power cable: a Weibull statistic approach, 2022 Conference of Russian Young

Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2022) 1163–1166. DOI: 10.1109/EI-ConRus54750.2022.9755588

[4] **A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, M. Repetto**, Optimal design of closed multilayer magnetic shields, 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium – Italy (ACES), (2017) 1–2. DOI: 10.23919/ROPACES.2017.7916413

[5] **A. Demenko**, Finite element modeling of magnetic field in electrical machines: Scalar or vector potential formulation part I: Comparative description of methods, 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), (2016) 1–6. DOI: 10.1109/WZEE.2016.7800208

[6] **B. Guo, Z. Djelloul-Khedda, F. Dubas**, Nonlinear analytical solution in axial flux permanent magnet machines using scalar potential, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 71 (4) (2024) 3383–3393. DOI: 10.1109/TIE.2023.3273247

[7] **E.A. Bodrenkov, E.Y. Kochetkova, A.A. Lebedeva, A.N. Modulina**, Calculations of the magnetic fields of the end zone of the asynchronized synchronous generator (ASG) by the scalar potential method, 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), (2021) 1245–1247. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396403

[8] **V.N. Zheleznyak, A.A. Burmistrov, N.V. Korovkin, A.S. Adalev**, Simulation of operating condition of the equipment of the short-circuit generator package, 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon), (2024) 865–868. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468512

[9] **H.-C. Jiang, Y.-L. He, G.-J. Tang, M.-X. Xu**, A comprehensive analysis on transient electromagnetic force behavior of stator windings in turbo-generator, Mathematical Problems in Engineering, 2018 (1) (2018) 189609. DOI: 10.1155/2018/4189609

[10] **A.A. Lyamin, S.L. Gulai, D.A. Verkhovtsev, S.D. Chishko**, Application of the method of visualization of polyharmonic vibration structures, Power Technology and Engineering, 54 (2021) 929–932. DOI: 10.1007/s10749-021-01308-0

[11] **M. Roytgarts, A. Smirnov**, Turbogenerator electromagnetic analysis with changing reactive load, 20th International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPPQ'22), 20 (2022) 434–437. DOI: 10.24084/repqj20.333

[12] **J.O. Park, J.S. Lee, I.H. Park**, Magnetic Field analysis of electric current in coplanar coils using equivalent permanent magnetization and magnetic scalar potential, IEEE Access, 12 (2024) 27556–27565. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3354060

[13] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine based on field-circuit formulation, Global Energy, 30 (02) (2024) 22–34. DOI: 10.18721/JEST.30201

[14] **K. Ishibashi, Z. Andjelic, Y. Takahashi, T. Takamatsu, T. Fukuzumi, S. Wakao**, Magnetic field evaluation at vertex by boundary integral equation derived from scalar potential of double layer charge, IEEE Transactions on Magnetics, 48 (2) (2012) 459–462. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174777

[15] **K.S. Demirchian, V.L. Chechurin**, Raschet vikhrevykh magnitnykh polei na osnove ispol'zovaniia skaliarnogo magnitnogo potentsiala, Elektrichestvo, 1 (1982) 7–14.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Elena Y. KOCHETKOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: k_ey@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2807-4688>

Alla A. LEBEDEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: alla280318@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-1288>

Tatiana G. MINEVICH – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: minevich_tg@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8137-2479>

Alexandra N. MODULINA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: modulina@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8860-3022>

Поступила: 10.03.2025; Одобрена: 24.03.2025; Принята: 09.04.2025.

Submitted: 10.03.2025; Approved: 24.03.2025; Accepted: 09.04.2025.

Научная статья

УДК 621.51+621.56

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31203>



С.С. Бусаров ✉, В.Л. Юша

Омский государственный технический университет (ОмГТУ),
Омск, Россия

✉ bssi1980@mail.ru

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННЫХ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ ВИНТОВЫХ МАСЛОЗАПОЛНЕННЫХ И ПОРШНЕВЫХ ТИХОХОДНЫХ ДЛИННОХОДОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Аннотация. Рассмотрены температурные режимы комбинированных многоступенчатых компрессорных агрегатов на базе винтовых маслозаполненных и поршневых тихоходных длинноходовых компрессоров в составе воздушных и азотных мобильных компрессорных станций. По результатам проведенных расчетно-теоретических исследований установлена взаимосвязь конструкции поршневых дожимных малорасходных компрессоров среднего и высокого давления на базе тихоходных длинноходовых ступеней с их температурным режимом и тепловой нагрузкой на теплообменные аппараты. Показано, что при фиксированном режиме работы винтового маслозаполненного компрессора низкого давления применение поршневых дожимных компрессоров на базе тихоходной длинноходовой ступени позволяет снизить тепловую нагрузку на теплообменные аппараты и обеспечить безопасный температурный режим при эксплуатации в широком диапазоне атмосферных температур. Полученные результаты позволяют прогнозировать улучшения удельных габаритных и весовых характеристик мобильных компрессорных станций.

Ключевые слова: комбинированные многоступенчатые компрессорные агрегаты, винтовой компрессор, поршневой компрессор, тихоходная длинноходовая ступень, рабочие процессы, температура газа, габаритные размеры, масса.

Для цитирования:

Бусаров С.С., Юша В.Л. Анализ температурных режимов комбинированных многоступенчатых компрессорных агрегатов на базе винтовых маслозаполненных и поршневых тихоходных длинноходовых компрессоров // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 29–41. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31203>



S.S. Busarov ✉, V.L. Yusha

Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk, Russia

✉ bssi1980@mail.ru

ANALYSIS OF TEMPERATURE CONDITIONS OF COMBINED MULTI-STAGE COMPRESSOR UNITS BASED ON SCREW OIL-FILLED AND PISTON LOW-SPEED LONG-STROKE COMPRESSORS

Abstract. The article considers the temperature conditions of combined multi-stage compressor units based on screw oil-filled and piston low-speed long-stroke compressors as part of air and nitrogen mobile compressor stations. Based on the results of the calculation and theoretical studies, the relationship between the design of low-flow medium- and high-pressure booster piston compressors based on long-stroke low-speed stages with their temperature conditions and the thermal load on heat exchangers has been established. It has been shown that at a fixed operating mode of a low-pressure screw oil-filled compressor, the use of booster piston compressors based on a low-speed long-stroke stage allows reducing the thermal load on heat exchangers and ensuring a safe temperature regime during operation in a wide range of atmospheric temperatures. The results obtained allow us to predict improvements in the specific overall dimensions and weight characteristics of mobile compressor stations.

Keywords: combined multi-stage compressor units, screw compressor, piston compressor, low-speed long-stroke stage, working processes, gas temperature, overall dimensions, weight.

Citation:

Busarov S.S, Yusha V.L., Analysis of temperature conditions of combined multi-stage compressor units based on screw oil-filled and piston low-speed long-stroke compressors, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 29–41, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31203>

Введение. Мобильные и транспортные компрессорно-технологические комплексы, или мобильные компрессорные станции (МКС), в том числе на автомобильной базе, широко применяются при строительстве и эксплуатации различных промышленных объектов, в том числе связанных с добычей, транспортированием и переработкой углеводородного сырья. Одним из вариантов конструктивного исполнения таких станций является применение комбинированных компрессорных агрегатов, в которых в качестве ступени низкого давления используется винтовой маслозаполненный компрессор (ВМК), а в качестве дожимного компрессора среднего или высокого давления – поршневой быстроходный компрессор¹. Известные недостатки поршневых быстроходных компрессоров, в том числе повышенные габаритные размеры, определяют ряд проблем при их применении в составе МКС, к которым предъявляются повышенные требования в части обеспечения минимальных размеров и веса². В связи с этим представляют интерес альтернативные варианты поршневых малорасходных компрессоров среднего и высокого давления, например на базе тихоходных длинноходовых ступеней (ДЛТПК), результаты исследования которых показали

¹ Компрессорные станции: производство и продажа. Купить компрессорные станции у производителя. Режим доступа: <https://nmz-group.ru/catalog/kompressornye-stantsii/> (дата обращения: 20.10.2024).

² Дизель-генераторные установки от ЧКЗ. Режим доступа: <https://www.chkz.ru/catalog/Diesel-generator-installations/> (дата обращения: 20.10.2024); Компрессоры продажа и производство, низкие цены | промышленные компрессоры – Уральский Компрессорный Завод. Режим доступа: <https://www.ukz.ru/> (дата обращения: 20.10.2024).

перспективность применения в различных технических объектах³. При этом, применительно к МКС, ДЛТПК в составе комбинированной многоступенчатой установки среднего или высокого давления представляет особый интерес и теоретически позволяет не только обеспечить эффективное охлаждение рабочего газа, но и существенно упростить технологическую схему многоступенчатой компрессорной установки, снизить ее габаритные размеры и вес [1].

Как было отмечено выше, в настоящее время отечественной промышленностью производится широкая номенклатура МКС, рассмотреть которую в полном объеме не представляется возможным. Поэтому в качестве объекта сравнения рассмотрим МКС на автомобильной базе со следующими параметрами: производительность по воздуху – 10 м³/мин или по азоту – 8 м³/мин; давление нагнетания – 25,0 МПа; компрессор низкого давления – ВМК; дожимной компрессор высокого давления – поршневой высокооборотный многоступенчатый компрессор; габаритные размеры МКС.

В качестве альтернативных вариантов рассмотрим азотную и воздушную МКС с одинаковыми ВМК, в которой в качестве дожимного применяется поршневой малорасходный компрессор на базе одной или нескольких ступеней ДЛТПК.

Целью настоящей статьи является анализ температурных режимов комбинированных многоступенчатых компрессорных агрегатов в составе азотных и воздушных МКС на базе ВМК и ДЛТПК.

Методика расчета

Объектом исследования являются рабочие процессы ДЛТПК среднего и высокого давления в составе комбинированного многоступенчатого агрегата МКС; при этом параметры состояния газа в стандартной точке всасывания и производительность ДЛТПК определяются параметрами на выходе ступени ВМК низкого давления, а в случае работы в режиме нагнетания азотной смеси (содержание азота – около 99%) – еще и параметрами газоразделительного блока МКС (рис. 1).

Во всех технологических схемах, представленных на рис. 1, компрессорный агрегат низкого давления включает в себя ВМК (1), узел маслоотделения и очистки сжатого воздуха низкого давления (2), маслоохладитель (3). Количество ступеней сжатия дожимного компрессорного агрегата (5...8, 13...15) указано иллюстративно и в реальных конструкциях МКС может отличаться в зависимости от технических требований и условий эксплуатации. Принципиальным отличием альтернативных схем МКС является возможное отсутствие межступенчатых и конечных теплообменников (9...12) у дожимного ДЛТПК, а в случае воздушной МКС – и охладителя воздуха низкого давления (4), так как при этом не требуется обеспечение регламентного температурного режима блока газоразделения (18) в связи с его отсутствием. В случае жидкостного охлаждения цилиндров ступеней ДЛТПК необходим дополнительный теплообменник (16). Очевидно также, что в схеме *a*) давление нагнетания ВМК с учетом известных допущений можно приблизительно принять равным давлению всасывания в дожимной компрессорный агрегат $P_H' \approx P_{BC}'$, при этом температура нагнетания ВМК существенно выше температуры всасывания в дожимной компрессорный агрегат $T_H' > T_{BC}'$; в схеме *b*) также $P_H' \approx P_{BC}'$, при этом и $T_H' > T_{BC}'$; в схемах *в*) и *г*) вследствие наличия блока газоразделения (17) $P_H' \approx P_{BC}'$, при этом и $T_H' > T_{BC}'$.

Для определения термодинамических параметров состояния рабочего газа в стандартной точке всасывания дожимного ДЛТПК и его производительности производится расчет рабочего процесса ВМК с применением известной методики на базе математической модели винтового компрессора с газожидкостным рабочим телом в гетерогенной постановке [1].

³ Производство компрессорного оборудования: поршневые компрессоры, дожимные компрессоры, АГНКС, газовые компрессоры, компрессорные станции – Краснодарский Компрессорный Завод. Режим доступа: <https://kkzav.ru/> (дата обращения: 20.10.2024).

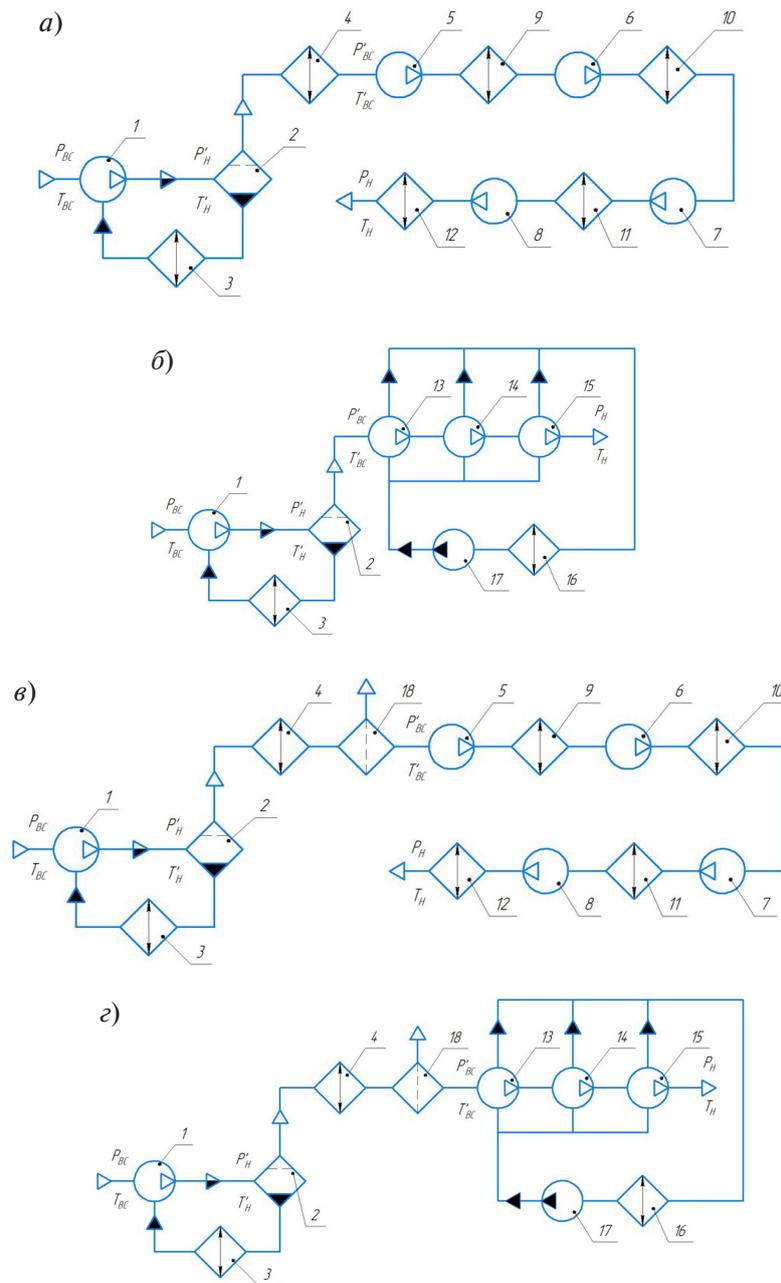


Рис. 1. Принципиальные технологические схемы существующих и альтернативных МКС: а) воздушная на базе поршневого дожимного быстроходного компрессора; б) воздушная на базе ДЛТПК; в) азотная на базе поршневого дожимного быстроходного компрессора; г) азотная на базе ДЛТПК: 1 – ступень низкого давления (ВМК), 2 – маслоотделитель, 3 – маслоохладитель, 4 – охладитель воздуха (азотной смеси) низкого давления, 5...8 – ступени поршневого дожимного компрессора, 9...10 – охладители воздуха (азотной смеси) среднего и высокого давления, 12 – конечной охладитель воздуха (азотной смеси) высокого давления, 13...15 – ступени дожимного ДЛТПК, 16 – теплообменник системы охлаждения цилиндров ступеней ДЛТПК, 17 – вспомогательный жидкостной насос, 18 – блок газоразделения

Fig. 1. Basic process flow diagrams of existing and alternative MCS: a) air based on a high-speed booster piston compressor; b) air based on a LSLSPC; c) nitrogen based on a high-speed booster piston compressor; d) nitrogen based on a LSLSPC: 1 – low pressure stage (PCOF), 2 – oil separator, 3 – oil cooler, 4 – low-pressure air (nitrogen mixture) cooler, 5...8 – booster piston compressor stages, 9...10 – medium and high pressure air (nitrogen mixture) coolers, 12 – high-pressure air aftercooler (nitrogen mixture), 13...15 – booster LSLSPC stages, 16 – heat exchanger of the LSLSPC stage cylinder cooling system, 17 – auxiliary liquid pump, 18 – gas separation unit

Расчет рабочих процессов ДЛТПК осуществлялся по известной, многократно апробированной и верифицированной методике [2–5], в которой в качестве основных допущений приняты следующие: газовая среда непрерывна и гомогенна; параметры состояния рабочего газа изменяются одновременно по всему объему рабочей камеры; изменение потенциальной и кинетической энергии газа пренебрежимо мало; теплота трения поршневых уплотнений не подводится к газу; параметры состояния в полостях всасывания и нагнетания постоянны; течение рабочего газа через газораспределительные органы и конструктивные зазоры принимается адиабатным; теплообмен между газом и стенками рабочих полостей конвективный; коэффициент теплоотдачи в каждый момент времени одинаков на всех внутренних поверхностях рабочей камеры. Кроме этого принято, что клапан всасывания сообщается с рабочей камерой лишь во время процесса всасывания и на начальном участке процесса сжатия; на последующем участке процесса сжатия вплоть до его окончания, а также во время процессов нагнетания и обратного расширения клапан всасывания перекрывается поршнем, и массовые потоки газа через неплотности закрытого клапана всасывания полностью отсутствуют. Температура поверхности стенок рабочей камеры изменяется как во время рабочего цикла, так и в зависимости от координат этой поверхности; при этом температура внешней охлаждающей среды и коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности цилиндра являются постоянными.

В данной методике система расчетных уравнений включает в себя уравнение первого закона термодинамики для тела переменной массы, уравнение состояния реального газа, уравнение Ньютона–Рихмана, калорическое уравнение, уравнение массового баланса, уравнение механической энергии, а также уравнения динамики клапанов и течения газа через клапаны и зазоры; процессы конвективного теплообмена и течения газа через зазоры рассчитывались с использованием эмпирических зависимостей для коэффициентов теплоотдачи и коэффициентов расхода [6–8]. Расчет нестационарного процесса теплопередачи между рабочим газом и внешней средой, рассматриваемого одновременно с основными рабочими процессами ступени, производился по известной методике, представленной в [6–8].

В соответствии с технологической схемой МКС тепловая нагрузка для различных вариантов ее реализации осуществлялась по следующему алгоритму.

Для базовой схемы МКС, включающей в себя ВМК низкого давления и поршневой дожимной быстроходный компрессор (рис. 1а, 1б), суммарная тепловая нагрузка на все теплообменные аппараты компрессорного агрегата применительно к азотной и воздушной МКС составит:

$$Q_{0\text{ВОЗДУХ}} = Q_1 + Q_2 + Q_{3\text{ВОЗДУХ}};$$

$$Q_{0\text{АЗОТ}} = Q_1 + Q_2 + Q_{3\text{АЗОТ}},$$

где Q_1 – тепловая нагрузка на маслоохладитель ВМК; Q_2 – тепловая нагрузка на воздушный теплообменный аппарат ВМК; Q_3 – суммарная тепловая нагрузка на межступенчатые и концевой теплообменные аппараты поршневого дожимного быстроходного компрессора.

Для альтернативной схемы МКС, включающей в себя ВМК низкого давления и поршневой дожимной одно-, двух- или трехступенчатый компрессор на базе ДЛТПК (рис. 1б, 1г), суммарная тепловая нагрузка на все теплообменные аппараты компрессорного агрегата применительно к азотной и воздушной МКС составит:

$$Q_{\text{ВОЗДУХ}} = Q_1 + Q_{4\text{ВОЗДУХ}};$$

$$Q_{\text{АЗОТ}} = Q_1 + Q_2 + Q_{4\text{АЗОТ}},$$

где Q_4 – тепловая нагрузка на теплообменный аппарат ДЛТПК (при охлаждении цилиндра жидкостью); при этом дополнительное охлаждение воздуха и азота в межступенчатых и конечных теплообменных аппаратах отсутствует, а в случае воздушной МКС отсутствует и охлаждение воздуха после ВМК.

Расчеты проводились при следующих условиях однозначности.

Для ВМК. Физические: рабочее тело – воздух, охлаждающая жидкость – масло. Геометрические: диаметр ведущего ротора – 0,2 м, относительная длина роторов – 0,9. Граничные: давление в камере всасывания – 0,1 МПа, температура в камере всасывания – 283...313 К, давление в камере нагнетания – 1,6 МПа, температура масла – 363 К, время рабочего цикла – 0,03 с.

Для ДЛТПК. Физические: рабочее тело – воздух или азот, материал деталей компрессорной ступени – сталь, внешняя охлаждающая среда – низкотемпературная жидкость. Геометрические: диаметр цилиндра – 0,25 м, ход поршня – 0,5 м, диаметр седла клапанов всасывания и нагнетания $d_{c0} = 0,0015$ м. Граничные: давление в камере всасывания – 1,6 МПа или 1,45 МПа, температура в камере всасывания равна температуре нагнетания после ВМК или после блока газоразделения, давление нагнетания в ступенях ДЛТПК – 8,0 МПа, 12,0 МПа, 16,0 МПа, 25,0 МПа, атмосферная температура – 273...323 К, время рабочего цикла – 3 с. Производительность воздушного ДЛТПК равна производительности ВМК, производительность азотной ДЛТПК при указанной выше эффективности блока газоразделения составляет около 80% от производительности ВМК. Количество ступеней ДЛТПК дожимного компрессорного блока – 1...3.

Результаты

Для определения величины давления и температуры рабочего тела на всасывании в поршневой дожимной компрессор был произведен расчет рабочих процессов ВМК по указанной выше методике при $P_{BC} = 0,1$ МПа, $P_H = 1,6$ МПа и $T_{BC} = 273...323$ К. При этом температура нагнетания ВМК составила 366...390 К. Соответственно для последующего расчетного анализа температурных режимов МКС принимаем для схемы а) $P_H' \approx P_{BC}' = 1,6$ МПа, $T_{BC}' = 293...343$ К; для схемы б) $P_H' \approx P_{BC}' = 1,6$ МПа, $T_{BC}' = 366...390$ К; для схем в) и г) $P_{BC}' = 1,45$ МПа, $T_{BC}' = 293...343$ К. При расчете ступеней ДЛТПК температура всасывания в каждую последующую ступень равна температуре нагнетания предыдущей ступени, при этом, согласно известным результатам и рекомендациям [9–12], перепад давления газа на каждой ступени составляет 25,0 МПа при одноступенчатой схеме, 12,0 МПа при двухступенчатой схеме и 8,0 МПа при трехступенчатой схеме.

Известные особенности рабочих процессов ДЛТПК [15 и др.] проявляются и при режимах работы в составе рассматриваемого комбинированного многоступенчатого компрессорного агрегата.

Из представленных индикаторных диаграмм следует, что повышенные температуры в стандартной точке всасывания рассматриваемых ступеней ДЛТПК приводят к снижению их производительности (рис. 2). Последнее графически характеризуется соответствующим уменьшением длительности процесса нагнетания и связано с уменьшением плотности рабочего тела в процессе всасывания. При этом высокие температуры в стандартной точке всасывания и интенсивное внешнее охлаждение цилиндра ДЛТПК приводят к снижению температуры рабочего тела в процессе всасывания (рис. 3), что является принципиальным отличием рабочих процессов ДЛТПК от рабочих процессов поршневых быстроходных ступеней. Кроме того, наблюдается интенсивное снижение температуры рабочего тела в процессе нагнетания, что также положительно отражается на температурном режиме ступени. Как показано на рис. 4, в зависимости от требований к допускаемой величине температуры нагнетания появляется перспектива применения дожимных ДЛТПК в составе рассматриваемого комбинированного многоступенчатого агрегата без использования межступенчатых теплообменных аппаратов (на рис. 4 линией А отмечен предельно допускаемый уровень температуры нагнетания в соответствии с федеральными нормами

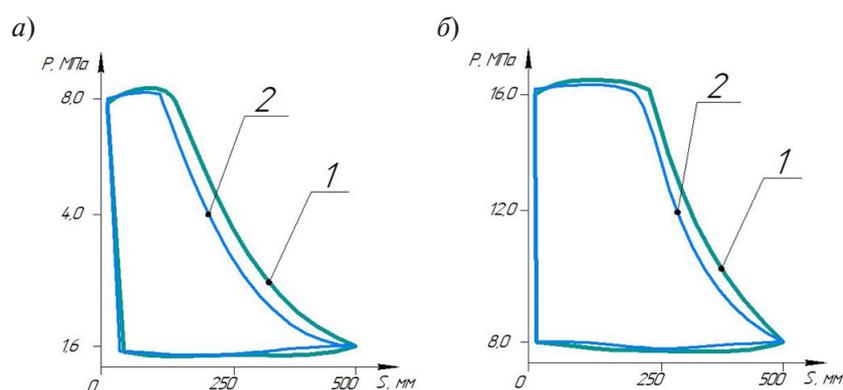


Рис. 2. Индикаторные диаграммы воздушной ступени ДЛТПК: *а)* при давлении всасывания 1,6 МПа, давлении нагнетания 8,0 МПа и температурах всасывания 313 К (диаграмма 1) и 390 К (диаграмма 2); *б)* при давлении всасывания 8,0 МПа, давлении нагнетания 16,0 МПа и температурах всасывания, равных средней температуре нагнетания первой ступени ДЛТПК при температурах всасывания в последней 313 К (диаграмма 1) и 390 К (диаграмма 2)

Fig. 2. Indicator diagrams of the air stage of the LSLSPC: *a)* at a suction pressure of 1.6 MPa, a discharge pressure of 8.0 MPa and suction temperatures of 313 K (diagram 1) and 390 K (diagram 2); *b)* at a suction pressure of 8.0 MPa, a discharge pressure of 16.0 MPa and suction temperatures equal to the average discharge temperature of the first stage of the LSLSPC at suction temperatures in the last 313 K (diagram 1) and 390 K (diagram 2)

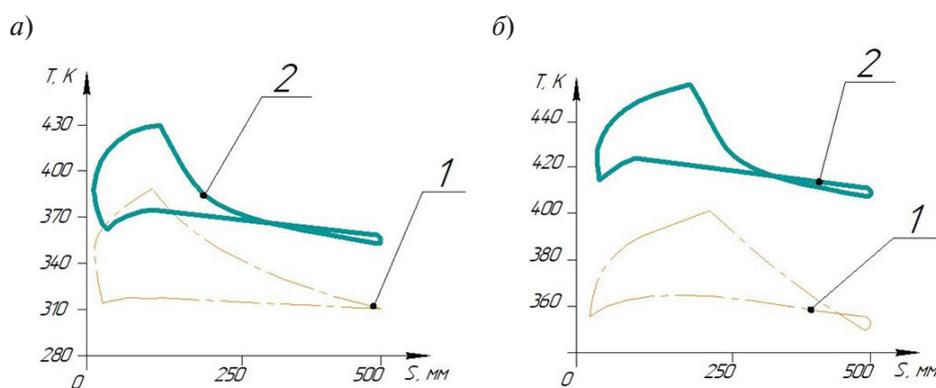


Рис. 3. Температурные диаграммы воздушной ступени ДЛТПК: *а)* при давлении всасывания 1,6 МПа, давлении нагнетания 8,0 МПа и температурах всасывания 313 К (диаграмма 1) и 390 К (диаграмма 2); *б)* при давлении всасывания 8,0 МПа, давлении нагнетания 16,0 МПа и температурах всасывания, равных средней температуре нагнетания первой ступени ДЛТПК при температурах всасывания в последней 313 К (диаграмма 1) и 390 К (диаграмма 2)

Fig. 3. Temperature diagrams of the air stage of the LSLSPC: *a)* at a suction pressure of 1.6 MPa, a discharge pressure of 8.0 MPa and suction temperatures of 313 K (diagram 1) and 390 K (diagram 2); *b)* at a suction pressure of 8.0 MPa, a discharge pressure of 16.0 MPa and suction temperatures equal to the average discharge temperature of the first stage of the DLTPK at suction temperatures in the last 313 K (diagram 1) and 390 K (diagram 2)

и правилами в области промышленной безопасности и ГОСТом⁴, линией *B* – в соответствии с [13–15]). В связи с этим уместно отметить, что при рассматриваемых режимах работы ступени

⁴ Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических и нефтеперерабатывающих производств» (Приказ от 15.12.2020 г. № 533 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору); ГОСТ Р 54802-2011 (ИСО 13631:2002) Нефтяная и газовая промышленность. Компрессоры поршневые газовые агрегатированные. Технические требования (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1166-ст). Дата введения 01.06.2013.

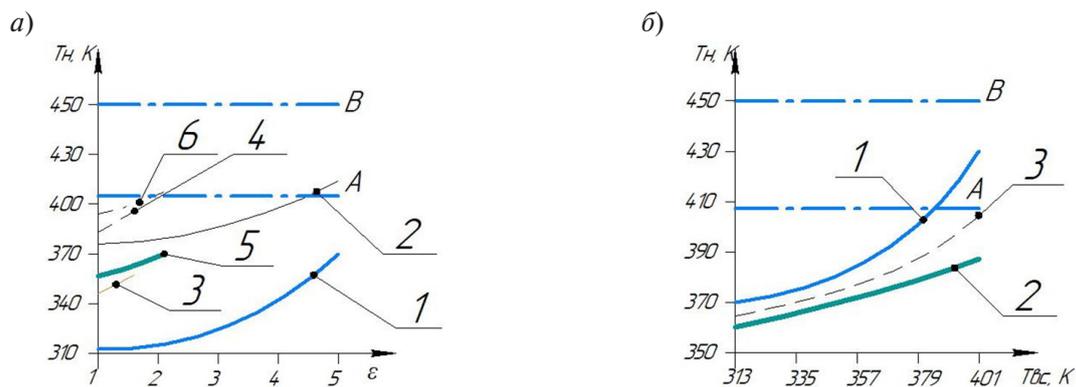


Рис. 4. Влияние режима работы воздушной ступени ДЛТПК на ее интегральные характеристики: а) влияние степени повышения давления газа в ступени ДЛТПК на ее среднюю температуру нагнетания: 1, 2 – давление всасывания 1,6 МПа при температурах всасывания 313 К (1) и 390 К (2); 3, 4 – давление всасывания 8,0 МПа при температурах всасывания 313 К (3) и 390 К (4); 5, 6 – давление всасывания 12,0 МПа при температурах всасывания 313 К (5) и 390 К (6); б) средняя температура нагнетания в зависимости от температуры всасывания: 1 – при давлении всасывания 1,6 МПа и давлении нагнетания 8,0 МПа; 2 – при давлении всасывания 8,0 МПа и давлении нагнетания 12,0 МПа; 3 – при давлении всасывания 12,0 МПа и давлении нагнетания 25,0 МПа

Fig. 4. Effect of the operating mode of the LSLSPC air stage on its integral characteristics: а) effect of the degree of gas pressure increase in the LSLSPC stage on its average discharge temperature: 1, 2 – suction pressure of 1.6 MPa at suction temperatures of 313 K (1) and 390 K (2); 3, 4 – suction pressure of 8.0 MPa at suction temperatures of 313 K (3) and 390 K (4); 5, 6 – suction pressure of 12.0 MPa at suction temperatures of 313 K (5) and 390 K (6); б) average discharge temperature depending on the suction temperature: 1 – at a suction pressure of 1.6 MPa and a discharge pressure of 8.0 MPa; 2 – at a suction pressure of 8.0 MPa and a discharge pressure of 12.0 MPa; 3 – at a suction pressure of 12.0 MPa and a discharge pressure of 25.0 MPa

(малая производительность, средние и высокие давления) снижение температуры воздуха или азота в трубопроводе сравнительно небольшой длины (около 1...2 м) даже без применения теплообменного аппарата может составить 10...60 К. Вследствие этого температуры всасывания в последующую ступень могут обеспечивать безопасный уровень температур нагнетания в еще более широком диапазоне рабочих режимов.

Таким образом, особенности рабочих процессов ДЛТПК, связанные с интенсивным охлаждением газа в проточной части рассматриваемой компрессорной ступени, позволяют предположить возможность существенного улучшения технических характеристик рассматриваемого комбинированного многоступенчатого компрессорного агрегата, в том числе за счет упрощения его системы охлаждения. Остановимся подробнее на этом вопросе.

На рис. 5 представлены результаты расчетов, отражающие влияние количества ступеней ДЛТПК на конечные средние температуры нагнетания рассматриваемых схем МКС в зависимости от конечного давления МКС при различных температурах атмосферного воздуха. Отметим, что в дожимной блоке ДЛТПК теплообменники отсутствуют (в соответствии с рис. 1).

Из этих результатов следует, что во многих случаях даже без применения межступенчатых и конечных теплообменников температура сжимаемого газа на выходе из МКС не превышает нормативных ограничений. То есть при рациональном подборе основных конструктивных размеров и режимных параметров ступеней ДЛТПК можно обеспечить существенное упрощение конструкции МКС в части теплообменного оборудования.

При этом, поскольку адиабатное сжатие в ступенях поршневых быстроходных компрессоров заменяется на квазиизотермическое сжатие в интенсивно охлаждаемых тихоходных ступенях ДЛТПК, улучшаются и энергетические характеристики дожимного компрессорного блока (рис. 6). Здесь относительная удельная мощность определяется как отношение суммарной удельной мощности всех квазиизотермических ступеней ДЛТПК к суммарной мощности всех

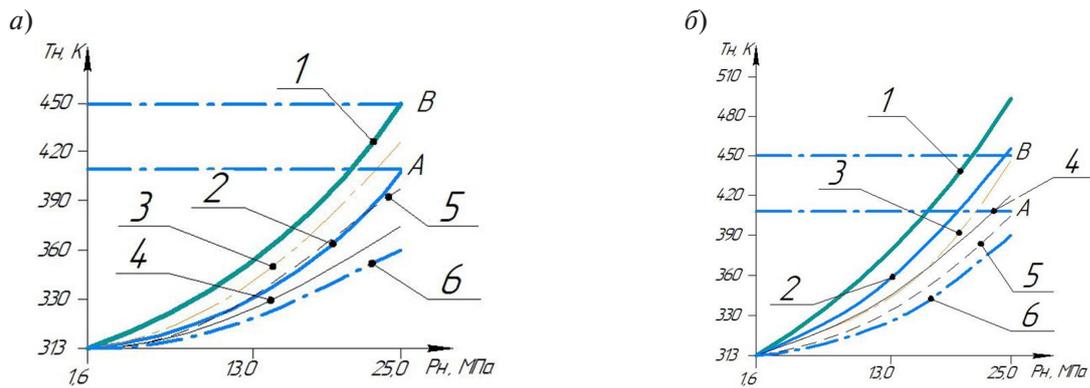


Рис. 5. Влияние количества ступеней ДЛТПК и конечного давления рассматриваемых МКС на их на конечные средние температуры нагнетания при атмосферной температуре 313 К (а) и 333 К (б): 1, 2 – одна ступень; 3, 4 – две ступени; 5, 6 – три ступени; 1, 3, 5 – $D = 50$ мм; 2, 4, 6 – $D = 25$ мм

Fig. 5. Effect of the number of stages of the LSLSPC and the final pressure of the considered MCS on their final average discharge temperatures at an atmospheric temperature of 313 K (a) and 333 K (b): 1, 2 – one stage; 3, 4 – two stages; 5, 6 – three stages; 1, 3, 5 – $D = 50$ mm; 2, 4, 6 – $D = 25$ mm

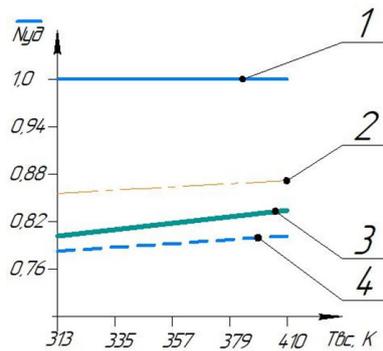


Рис. 6. Влияние количества ступеней ДЛТПК и атмосферной температуры на индикаторный КПД дожимного блока на базе ДЛТПК: 1 – поршневой дожимной быстроходный многоступенчатый компрессор; 2 – одноступенчатый ДЛТПК; 3 – двухступенчатый ДЛТПК; 4 – трехступенчатый ДЛТПК

Fig. 6. Effect of the number of stages of the LSLSPC and atmospheric temperature on the indicated efficiency of the booster unit based on the LSLSPC: 1 – high-speed multi-stage booster piston compressor; 2 – single-stage LSLSPC; 3 – two-stage LSLSPC; 4 – three-stage LSLSPC

ступеней поршневого дожимного быстроходного компрессора при адиабатном сжатии газа (рассмотрены одно-, двух- и трехступенчатые варианты):

$$\bar{N}_{уд} = N_{I,II,III} \text{ уд} / N_{ад} \text{ уд}. \quad (1)$$

Как видно из представленных результатов, в рассматриваемом случае замена поршневого быстроходного многоступенчатого компрессора на ДЛТПК позволяет снизить энергопотребление дожимного компрессорного агрегата примерно на 10–20%.

На рис. 7 представлены результаты расчетов, отражающие величину тепловой мощности теплообменного оборудования при различных схемах МКС (в соответствии с рис. 1).

Из предварительного теоретического анализа с использованием идеальной модели компрессора известно, что в общем случае снижение политропы процесса сжатия за счет интенсивного

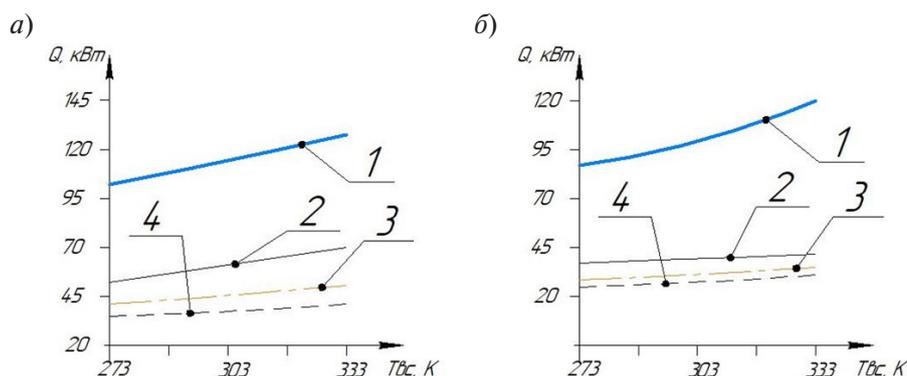


Рис. 7. Влияние количества ступеней ДЛТПК и величины атмосферной температуры на изменение тепловой нагрузки теплообменного оборудования дожимного компрессорного блока воздушной (а) и азотной (б) МКС: 1 – поршневой дожимной быстроходный многоступенчатый компрессор; 2 – одноступенчатый ДЛТПК; 3 – двухступенчатый ДЛТПК; 4 – трехступенчатый ДЛТПК

Fig. 7. Effect of the number of stages of the LSLSPC and the atmospheric temperature on the change in the thermal load of the heat exchange equipment of the booster compressor unit of the air (a) and nitrogen (b) MCS: 1 – high-speed multi-stage booster piston compressor; 2 – single-stage LSLSPC; 3 – two-stage LSLSPC; 4 – three-stage LSLSPC

охлаждения компрессорной ступени позволяет снизить тепловую нагрузку на теплообменное оборудование, вес и габаритные размеры последнего [16, 17]. Представленные в данной статье результаты расчетов действительных ступеней ДЛТПК с учетом уникальных особенностей их рабочих процессов показывают, что тепловая нагрузка на теплообменное оборудование дожимного компрессорного блока применительно к рассматриваемым МКС может быть снижена в 2–3 раза. При этом важно отметить, что при замене газоохладителей высокого и среднего давления на водяные радиаторы существенно снижается и удельная металлоемкость теплообменного оборудования⁵. В совокупности со снижением соответствующих коммуникаций полученные результаты отражают возможность существенного упрощения конструкции МКС и снижения стоимости ее комплектующих.

Выводы

На примере комбинированных многоступенчатых компрессорных агрегатов на базе винтовых маслозаполненных и поршневых тихоходных длинноходовых компрессоров в составе воздушных и азотных мобильных компрессорных станций показано, что замена поршневого быстроходного многоступенчатого компрессора на ДЛТПК позволяет обеспечить безопасный температурный уровень в широком диапазоне атмосферных температур, снизить энергопотребление дожимного компрессорного агрегата примерно на 10–20% и тепловую нагрузку на теплообменное оборудование дожимного компрессорного блока применительно к рассматриваемым МКС примерно в 2–3 раза. При этом существенно снизится удельная металлоемкость теплообменного оборудования, упростится система трубопроводной обвязки и т.п., что в совокупности позволяет прогнозировать не только упрощение конструкции МКС в целом, но и снижение стоимости ее комплектующих.

⁵ Пластинчатый теплообменник E8-S-32 (Ду 32) купить на сайте компании E8 | E8company.ru. Режим доступа: https://e8company.ru/catalog/teploobmenniki/e8_teploobmenniki/e8_s_32/ (дата обращения: 05.04.2025); Теплообменники газовойдачные ГПМ-ТГ-80/10,0 | Газпромаш, Саратов. Режим доступа: <https://www.gazprommash.ru/production/catalog/tg/teploobmenniki-gazovodyanye-gpm-tg-80100/> (дата обращения: 05.04.2025); Пластинчатый теплообменник E8-GR-50 (Ду 50) купить на сайте компании E8 | E8company.ru. https://e8company.ru/catalog/teploobmenniki/e8_teploobmenniki/e8_gr_50/#props (дата обращения: 05.04.2025).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Юша В.Л. Создание и совершенствование ступеней компрессоров объемного действия для автономных мобильных установок: дисс. ... доктора техн. наук: 05.04.06: защищена 19 ноября 2008 г. Москва, 2008. 426 с.
- [2] Юша В.Л. Научно-технологические предпосылки совершенствования и промышленного освоения малорасходных компрессорных агрегатов на базе длинноходовых поршневых ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39
- [3] Yusha V.L., Busarov S.S., Gromov A.Y. Assessment of the prospects of development of medium-pressure single-stage piston compressor units, Chemical and Petroleum Engineering, 53 (2017) 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2
- [4] Бусаров С.С. Создание и совершенствование бесшмазочных поршневых компрессоров среднего и высокого давления на базе малорасходных тихоходных длинноходовых ступеней: дисс. ... доктора техн. наук: 2.5.10: защищена 17 мая 2024 г. Омск, 2024. 325 с.
- [5] Юша В.Л. Анализ термодинамической эффективности теоретического многоступенчатого компрессора с комбинированным применением адиабатного, изотермического и субизотермического процессов сжатия // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 29–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-29-38
- [6] Бусаров С.С., Юша В.Л., Кобыльский Р.Э. Экспериментальная оценка эффективности манжетного уплотнения цилиндропоршневой группы длинноходовой компрессорной ступени // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 3. С. 20–27. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-20-27
- [7] Бусаров И.С., Бусаров С.С., Юша В.Л. Влияние деформации проточной части эластомерных элементов самодействующих клапанов на характеристики тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 4. С. 33–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-33-38
- [8] Busarov I.S., Yusha V.L., Busarov S.S., Kobyl'skii R.E. Comparative evaluation of methods for calculating the dynamics of self-acting valves in reciprocating compressor units, Chemical and Petroleum Engineering, 56 (2020) 644–652. DOI: 10.1007/s10556-020-00824-6
- [9] Пластинин П.И., Юша В.Л., Бусаров С.С. Анализ нестационарных температурных полей в стенках цилиндра компрессорной ступени // Омский научный вестник Сер. Энергетика. 2006. Т. 39, № 5. С. 96–101.
- [10] Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э., Сеницын Н.Г. Теоретическая оценка возможности уменьшения массовых утечек рабочей среды из камеры поршневого компрессора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. Т. 141, № 2. С. 101–111. DOI: 10.18698/0236-3941-2022-2-101-111
- [11] Юша В.Л., Бусаров С.С., Крицкий В.И. Исследование процессов теплопередачи в ступени поршневого компрессора при несимметричном температурном поле // Известия Вузов. Горный Журнал. 2007. № 6. С. 59–66.
- [12] Бусаров С.С. Повышение эффективности компрессорного оборудования дорожно-строительных машин: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.04: защищена 17 декабря 2008 г. Омск, 2008. 123 с.
- [13] Юша В.Л. Системы охлаждения и газораспределения объемных компрессоров. Новосибирск: Наука, 2006. 236 с.
- [14] Васильев Ю.С., Петреня Ю.К., Солдатова К.В., Рекстин А.Ф., Дроздов А.А. Труды политехнической научной школы турбокомпрессоростроения 21 века. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. 384 с.
- [15] Хисамеев И.Г., Максимов В.А. Двухроторные винтовые и прямозубые компрессоры: теория, расчет и проектирование. Казань: ФЭН, 2000. 638 с.

[16] **Бураков А.В., Котлов А.А., Левихин А.А.** Компрессорное оборудование для повышения эффективности комплексов переработки твердых органических отходов // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 3. С. 54–62. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-3-54-62

[17] **Котлов А.А., Кузнецов Ю.Л., Бураков А.В.** Анализ работы поршневого компрессора, работающего в составе автомобильной газонаполнительной компрессорной станции // Компрессорная техника и пневматика. 2019. № 2. С. 27–32.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУСАРОВ Сергей Сергеевич – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.

E-mail: bssi1980@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-0547>

ЮША Владимир Леонидович – заведующий кафедрой, Омский государственный технический университет, д-р техн. наук.

E-mail: yusha@omgtu.ru

REFERENCES

[1] **V.L. Yusha**, Sozdanie i sovershenstvovanie stupenei kompressorov ob"emnogo deistviia dlia avtonomnykh mobil'nykh ustanovok. Diss. doktora tekhn. nauk [Creation and improvement of stages of positive displacement compressors for autonomous mobile units. Doctor of Technical Sciences diss.], Moscow, 2008.

[2] **V.L. Yusha**, Scientific and technological prerequisites for improvement and industrial development of low-flow compressor units based on long-stroke piston stages, Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering, 6 (3) (2022) 24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39

[3] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.Y. Gromov**, Assessment of the prospects of development of medium-pressure single-stage piston compressor units, Chemical and Petroleum Engineering, 53 (2017) 453–458. DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2.

[4] **S.S. Busarov**, Sozdanie i sovershenstvovanie bessmazochnykh porshnevnykh kompressorov srednego i vysokogo davleniia na baze maloraskhodnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupenei. Diss. doktora tekhn. nauk [Creation and improvement of lubrication-free piston compressors of medium and high pressure based on low-flow, low-speed, long-stroke stages. Doctor of Technical Sciences diss.], Omsk, 2024.

[5] **V.L. Yusha**, Analysis of the thermodynamic efficiency of a theoretical multi-stage compressor with the combined use of adiabatic, isothermal and subisothermal compression processes, Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering, 8 (4) (2024) 29–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2024-8-4-29-38

[6] **S.S. Busarov, V.L. Yusha, R.E. Kobylskiy**, Experimental evaluation of effectiveness of lip seal of cylinder-piston group of long-stroke compressor stage, Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering, 4 (3) (2020) 20–27. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-3-20-27

[7] **I.S. Busarov, S.S. Busarov, V.L. Yusha**, The effect of deformation of flow part of elastomeric elements of self-acting valves on characteristics of low-speed long-stroke compressor stages, Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering, 5 (4) (2021) 33–38. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-4-33-38

[8] **I.S. Busarov, V.L. Yusha, S.S. Busarov, R.E. Kobyl'skii**, Comparative evaluation of methods for calculating the dynamics of self-acting valves in reciprocating compressor units, Chemical and Petroleum Engineering, 56 (2020) 644–652. DOI: 10.1007/s10556-020-00824-6

[9] **P.I. Plastinin, V.L. Yusha, S.S. Busarov**, Analiz nestatsionarnykh temperaturnykh polei v stenkakh tsilindra kompressornoi stupeni [Analysis of non-stationary temperature fields in the walls of the compressor stage cylinder], Omsk Scientific Bulletin. Series Energy, 5 (39) (2006) 96–101.

[10] **S.S. Busarov, R.E. Kobylskiy, N.G. Sinitsin**, Theoretical assessment of possible reduction in mass leaks of working medium from a reciprocating compressor chamber, Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering, 2 (141) (2022) 101–111. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-101-111>

[11] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, V.I. Krinitskii**, Issledovanie protsessov teploperedachi v stupeni porshnevo-go kompressora pri nesimmetrichnom temperaturnom pole [Study of heat transfer processes in a piston compressor stage with an asymmetric temperature field], Izvestiia Vuzov. Gornyi Zhurnal [News of Universities. Mining Journal], 6 (2007) 59–66.

[12] **S.S. Busarov**, Povyshenie effektivnosti kompressorного oborudovaniia dorozhno-stroitel'nykh mashin. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of compressor equipment for road construction machines: Cand. of Technical Sciences diss.], Omsk, 2008.

[13] **V.L. Yusha**, Sistemy okhlazhdeniia i gazoraspredeleniia ob"emnykh kompressorov [Cooling and gas distribution systems for positive displacement compressors]. Novosibirsk: Nauka, 2006.

[14] **Yu.S. Vasil'ev, Yu.K. Petrenia, K.V. Soldatova, A.F. Rekstin, A.A. Drozdov**, Trudy politekhnicheskoi nauchnoi shkoly turbokompressorostroeniia 21 veka [Proceedings of the Polytechnic Scientific School of Turbocompressor Engineering of the 21st Century]. St. Petersburg: POLITEKH-PRESS, 2023.

[15] **I.G. Khisameev, V.A. Maksimov**, Dvukhrotornnye vintovye i priamozubye kompressory: teoriia, raschet i proektirovanie [Twin-rotor screw and spur compressors: theory, calculation and design]. Kazan: Fen, 2000.

[16] **A.V. Burakov, A.A. Kotlov, A.A. Levikhin**, Compressor equipment for enhancing efficiency of solid organic waste processing plants, Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering, 5 (3) (2021) 54–62. DOI: [10.25206/2588-0373-2021-5-3-54-62](https://doi.org/10.25206/2588-0373-2021-5-3-54-62).

[17] **A.A. Kotlov, Yu. Kuznetsov, A. Byrakov**, The analysis of the operation of a piston compressor working as a part of automobile gas-filling compressor stations, Kompessornaia tekhnika i pnevmatika [Compressor technology and pneumatics], 2 (2019) 27–32.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey S. BUSAROV – *Omsk State Technical University*.

E-mail: bsi1980@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-0547>

Vladimir L. YUSHA – *Omsk State Technical University*.

E-mail: yusha@omgtu.ru

Поступила: 11.04.2025; Одобрена: 07.05.2025; Принята: 08.05.2025.

Submitted: 11.04.2025; Approved: 07.05.2025; Accepted: 08.05.2025.

Научная статья

УДК 504.75/620.9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31204>



Ю.В. Мозжегорова [✉], Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет», Пермь, Россия

[✉] juliagubaha@mail.ru

УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ТВЕРДООКСИДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Аннотация. В настоящее время вырос интерес к энергетическим установкам на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) как объектам малой генерации. Для оценки углеродного следа использования топлива в энергоустановке на основе ТОТЭ необходимо учитывать этапы жизненного цикла топлива и энергоустановки. В статье представлен комплексный подход для оценки жизненного цикла энергоустановок на основе ТОТЭ и анализ их воздействия на окружающую среду. Приведены основные параметры, характеристики, ресурсы, применяемые для оценки этапов жизненного цикла энергетических установок на основе ТОТЭ, а также проведена оценка вклада материалов в углеродный след производства энергоустановки. Для исследований была использована опытная энергетическая установка на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт, разработанная в России. На основании оценки углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ было определено, что основной вклад вносит этап эксплуатации (около 70%), при этом общий углеродный след составил 516,9 г CO₂-экв./кВт*ч. Определено, что углеродный след рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт сопоставим с углеродным следом других энергоустановок, что свидетельствует о ее эффективности в части выбросов парниковых газов.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, энергетические установки малой генерации, углеродный след, оценка жизненного цикла.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Водородная энергетика. Материалы и технологии хранения, транспортировки и применения водорода и водородсодержащих смесей» (FSNM-2023-0004).

Для цитирования:

Мозжегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н. Углеродный след энергетической установки на основе твердооксидного топливного элемента // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 42–56. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31204>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31204>*Yu.V. Mozzhegorova* ✉, *G.V. Ilinykh*, *V.N. Korotaev*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
“Perm National Research Polytechnic University”, Perm, Russia✉ juliagubaha@mail.ru

CARBON FOOTPRINT OF A SOLID OXIDE FUEL CELL POWER PLANT

Abstract. Currently, interest in solid oxide fuel cell (SOFC) power plants as small-scale generation facilities has increased. To assess the carbon footprint of fuel use in a SOFC power plant, it is necessary to take into account the stages of the fuel and power plant life cycles. The article presents an integrated approach to assessing the life cycle of SOFC power plants and analyzing their environmental impact. The main parameters, characteristics, and resources used to assess the life cycle stages of SOFC power plants are presented, and the contribution of materials to the carbon footprint of power plant production is assessed. A 2.5 kW SOFC pilot power plant developed in Russia was used for the research. Based on the carbon footprint assessment of the SOFC power plant under consideration, it was determined that the main contribution is made by the operation stage (about 70%), while the total carbon footprint was 516.9 g CO₂-eq./kWh. It was determined that the carbon footprint of the considered power plant based on SOFC with a capacity of 2.5 kW is comparable to the carbon footprint of other power plants, which indicates its efficiency in terms of greenhouse gas emissions.

Keywords: solid oxide fuel cell, small generation power plants, carbon footprint, life cycle assessment.

Acknowledgements: The work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Hydrogen energy. Materials and technologies for storage, transportation and use of hydrogen and hydrogen-containing mixtures” (FSNM-2023-0004).

Citation:

Mozzhegorova Yu.V., Ilinykh G.V., Korotaev V.N., Carbon footprint of a solid oxide fuel cell power plant, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 42–56, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31204>

Введение. В связи со сложностью территориальной структуры российской энергетики важным направлением ее развития становится децентрализованное производство энергии, когда электроэнергия и/или тепло вырабатываются непосредственно в месте потребления, а мощность генераторов определяется потребностями конкретных пользователей.

В настоящее время вырос интерес к энергетическим установкам (ЭУ) на основе твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), которые могут эксплуатироваться в различных территориальных и климатических условиях. Себестоимость генерируемой ими электроэнергии ниже, чем у других типов топливных элементов, в которых используются дорогостоящие катализаторы (платина и пр.) [1].

Энергоустановки на основе ТОТЭ могут работать на различных видах топлива: природный газ, метан, пропан, диметиловый эфир, дизельное топливо, биотопливо и т.д. В настоящее время разработкой и выпуском энергоустановок на основе ТОТЭ на низкоуглеродных видах топлива занимается множество компаний: “General Electric”, “Mitsubishi Power”, “Bloom Energy”, “Doosan Fuel Cell Co.”, “Nedstack Fuel Cell Technology”, “Elcogen” и пр. К примеру, компания “H2e Power Systems Inc.” (США) производит микро-ТЭЦ на основе ТОТЭ “Galileo” (1,5 кВт),

которая может работать на метано-водородном топливе¹. Компанией “Elcogen” (Эстония) разработаны топливные ячейки “elcosell” и батарея ТОТЭ “elcoStack”, которая может работать на природном газе, метаноле, этаноле, биогазе, с возможностью работы на водороде². Топливные элементы “Elcogen” используются в энергоустановке, работающей на биогазе, для производства электроэнергии на ферме по выращиванию креветок, расположенной в Бенче (Вьетнам)³. Имеются серийные производства энергоустановок на основе ТОТЭ, работающих на водородном топливе. Компания “PowerCell” (Швеция) выпускает батареи ТОТЭ малой мощности (2–3 кВт) с его использованием⁴. Энергетическая установка на основе ТОТЭ (300 кВт), разработанная компанией “Bloom Energy” (США), позволяет работать на 100%-ном водородном топливе⁵. Компания “Electric Works” выпустила новый генератор на основе ТОТЭ на водороде в Австралии, Европе и Китае. Когенерационная система “H2 KIBOU” производит около 8,2 кВт тепла и до 10 кВт электроэнергии⁶.

В России крупнейшим источником парниковых газов (ПГ) является топливно-энергетическая отрасль. 7% мировых выбросов углекислого газа приходится на энергетику [2]. ТОТЭ ввиду высокого КПД (до 70% по выработке электроэнергии) способствуют снижению выбросов ПГ на единицу произведенной энергии. Однако важно учитывать также косвенные выбросы ПГ от производства самой установки. Для оценки углеродного следа электроэнергии, генерируемой в ТОТЭ, необходимо учитывать этапы жизненного цикла топлива и энергоустановки [3].

Оценка выбросов ПГ энергоустановок на основе ТОТЭ является довольно сложной задачей. Это обусловлено большим количеством материалов, необходимых для производства, а также трудоемкими технологическими процессами, включающими обработку и многоэтапную технологию изготовления батарей ТОТЭ. Энергетические установки на основе ТОТЭ – сложные технические устройства, что затрудняет проведение оценки их жизненного цикла на каждом этапе. Для решения такой задачи необходимо установить, какие этапы, материалы, ресурсы целесообразно учитывать, а какие можно исключить из оценки жизненного цикла. В связи с этим актуальным является разработка комплексного методического подхода к оценке жизненного цикла энергоустановок на основе ТОТЭ и анализ их воздействия на окружающую среду.

Методы и материалы

Оценка жизненного цикла представляет собой методологическую базу для анализа и оценки экологического воздействия, связанного с полным жизненным циклом продукта (изделия). Основные положения по оценке жизненного цикла представлены в ГОСТ Р ИСО 14040-2022⁷ [3].

Для энергетических установок на основе топливных элементов, предназначенных для тепло- и электроснабжения жилых помещений, разработан ГОСТ Р 56188.9.102-2023⁸. Ввиду того, что энергоустановки на основе ТОТЭ можно отнести к сложным техническим устройствам, оценка жизненного цикла выполнялась на основании ранее опубликованной методологии [4].

¹ Solid Oxide Fuel Cell. Режим доступа: <https://www.h2epower.net/solid-oxide-fuel-cell/> (дата обращения: 15.03.2025).

² Solid oxide stacks for fuel cell systems. Режим доступа: <https://elcogen.com/products/solid-oxide-stacks-for-fuel-cell-systems/> (дата обращения: 10.03.2025).

³ Power generation from biogas with fuel cell technology in Vietnam. Режим доступа: <https://elcogen.com/casestudies/power-generation-from-biogas-with-fuel-cell-technology-in-vietnam/> (дата обращения: 12.03.2025).

⁴ Hydrogen Fuel Cell Stacks. Режим доступа: <https://powercellgroup.com/fuel-cell-stacks/> (дата обращения: 18.03.2025).

⁵ Hydrogen Fuel Cell. Bloom Energy. Режим доступа: <https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/hydrogen-data-sheet.pdf> (дата обращения: 18.03.2025).

⁶ Panasonic Launches 10 kW Pure Hydrogen Fuel Cell Generator in Europe, Australia, and China. Режим доступа: <https://news.panasonic.com/global/press/en240425-1> (дата обращения: 20.03.2025).

⁷ Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принципы и структура. ГОСТ Р ИСО 14040–2022. 2022. 24 с.

⁸ Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Технологии топливных элементов. Часть 9-102. Методология оценки экологических характеристик энергетических установок на основе топливных элементов в рамках обзора жизненного цикла. Стационарные когенерационные энергетические установки на основе топливных элементов для жилых помещений. Правила группы однородной продукции для разработки экологической декларации. ГОСТ Р 56188.9.102–2023. 2023. 32 с.

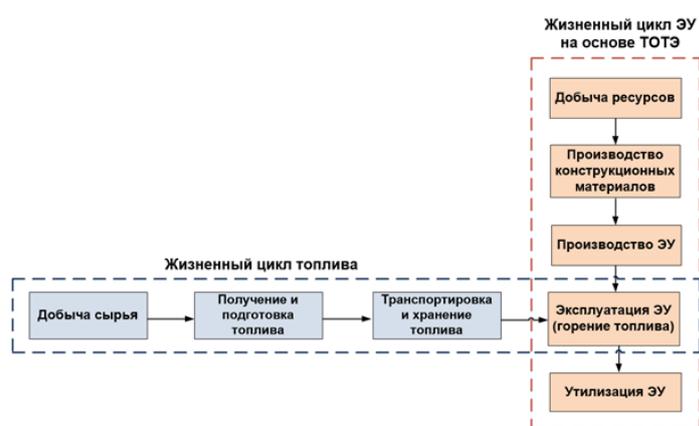


Рис. 1. Жизненный цикл топлива и энергоустановки на основе ТОТЭ

Fig. 1. Life cycle of the fuel and a SOFC power plant

Согласно анализу исследований [5–9] и требований ГОСТ Р 56188.9.102-2023, в качестве функциональной единицы для расчета углеродного следа энергоустановки на основе ТОТЭ используется $\text{г CO}_2\text{-экв./кВт}\cdot\text{ч}$.

На рис. 1 представлена совмещенная схема жизненных циклов топлива и энергоустановки на основе ТОТЭ, пересекающиеся на этапе эксплуатации, обозначены границы жизненного цикла, использованные в данном исследовании. При проведении оценки жизненного цикла энергетической установки на основе ТОТЭ необходимо учитывать этапы ее производства, производства топлива и электрической энергии, а также эксплуатации и окончания срока службы^{7,8}. Все этапы жизненного цикла в совокупности влияют на выбросы ПГ.

Обзор научных исследований по оценке жизненного цикла энергоустановок на основе ТОТЭ позволил выявить общие принципы оценки жизненного цикла таких устройств. При оценке жизненного цикла в составе энергоустановки на основе ТОТЭ обычно выделяют 4–20 материалов (металлы, керамика, пластик и пр.) [1, 5–24], учитывают обработку материалов (литье, формование, спекание, резка для производства батареи ТОТЭ, листовой прокат стали и т.д.). Дополнительно могут учитываться растворители, связующие, катализаторы, деионизированная вода и др. [5–7, 13–15, 18, 23]. На этапе эксплуатации энергоустановки учитывается расход топлива. При оценке жизненного цикла редко учитывают технологии обработки материалов, транспортировку материалов/конструкций и их техническое обслуживание.

Оценка воздействия на окружающую среду энергетической установки на основе ТОТЭ проводилась по выбросам ПГ [4].

Рассматриваемая энергетическая установка на основе ТОТЭ

В качестве объекта исследования была выбрана опытная энергетическая установка на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт, разработанная и изготовленная в Российской Федерации. Энергоустановка предназначена для использования в удаленных населенных пунктах и промышленных объектах (например, предприятиях нефтегазового сектора). На рис. 2 представлен общий вид разработанной энергетической установки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт.

Энергетическая установка на основе ТОТЭ состоит из корпуса, высокотемпературного блока (ВТБ), системы управления, прочего вспомогательного оборудования (система подачи газа, насосы, фильтры, счетчики и т.д.) [26]. КПД с учетом собственных нужд составляет не менее 48%.

В качестве основного топлива для энергетической установки рассматривается природный газ. ВТБ энергоустановки включает топливный процессор, внутри которого происходит генерация синтез-газа методом парового риформинга природного газа (метана) [27]. Энергоустановка может использовать, помимо природного газа, и другие виды топлива, например водород

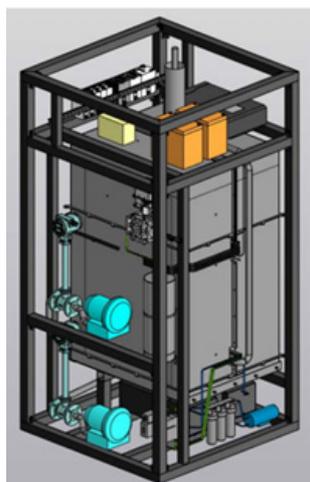


Рис. 2. Общий вид энергетической установки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт [25]

Fig. 2. General view of a SOFC power plant with a capacity of 2.5 kW

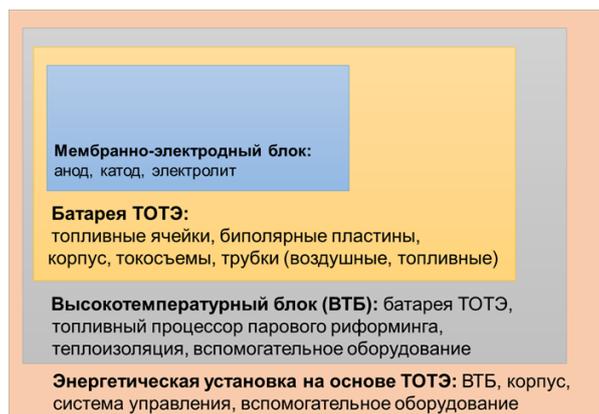


Рис. 3. Элементы оценки жизненного цикла энергетической установки на основе ТОТЭ

Fig. 3. Elements of life cycle assessment of a SOFC power plant

или биогаз. Использование низкоуглеродного или биогенного топлива позволит снизить углеродный след генерируемой энергии.

При оценке жизненного цикла энергетической установки на основе ТОТЭ были учтены следующие компоненты (рис. 3): собственно энергетическая установка на основе ТОТЭ, состоящая из корпуса, ВТБ, системы управления и вспомогательного оборудования. ВТБ содержит топливный процессор, батарею ТОТЭ, состоящую из топливных ячеек.

Результаты

Оценка углеродного следа энергоустановки на основе ТОТЭ при ее производстве и использовании в условиях Российской Федерации была проведена согласно методологии, описанной в [4]. Границы системы жизненного цикла энергоустановки включали производство материалов, в том числе их обработку, сборку и монтаж, эксплуатацию и утилизацию отходов после окончания службы энергоустановки.

Инвентаризационный анализ при производстве энергоустановки на основе ТОТЭ включал сбор информации об основных потоках сырья и материалов. При определении расхода сырья

и материалов для энергетической установки на основе ТОТЭ использовались сведения, представленные разработчиком энергоустановки (табл. 1).

Таблица 1

Вклад материалов в углеродный след производства энергоустановки на основе ТОТЭ

Table 1

Contribution of materials to the carbon footprint of the production of a power plant based on SOFC

Материал	Масса, кг	Содержание, %	Источник	Углеродный след*, кг CO ₂ -экв. / кг материала	На 1 энергетическую установку	
					Углеродный след, кг CO ₂ -экв.	Вклад материалов в углеродный след, %
Сталь конструкционная	410	37,9	⁹	5,1	2078,7	57,3
Сталь нержавеющая	270,8	25,1	10	1,9	511,8	14,1
Минеральное волокно	181	16,8	¹⁰	1,1	195,5	5,4
Огнеупорная глина	20	1,9	[28]	0,2	3,4	0,1
Керамика (жаропрочный технический фарфор)	3,6	0,3	[29]	0,3	1,2	0,0
АБС**	27,5	2,5	¹¹	3,7	101,8	2,8
Смесь пластиков АБС и ПК	14	1,3	^{11, 12}	4,6	64,4	1,8
ПА	20	1,9	¹³	6,5	130,0	3,6
Медь	50	4,6	10	5,5	275,0	7,6
Свинец	60	5,6	[30]	1,3	78,0	2,1
Ni-YSZ***	21,9	2,0	[24]	7,0	153,3	4,2
LSCF-CGO****	1,2	0,1	[24]	25,0	30	0,8
YSZ*****	0,4	0,04	[5]	12,9	5,16	0,1
Общее	1080,4	100			3628,2	100

* Углеродный след материалов взят для материалов аналогов, используемых при производстве схожих батарей ТОТЭ.

**АБС – акрилонитрилбутадиенстирол.

***Ni-YSZ – иттрия-стабилизированный цирконий с никелем.

****LSCF-CGO – аерро-кобальтит лантана стронция – церат гадолия.

*****YSZ – иттрия-стабилизированный цирконий.

Основными материалами, используемыми для производства компонентов энергоустановки на основе ТОТЭ, являются конструкционная и нержавеющая стали (63%), минеральное волокно, которое составляет относительно большой процент общей массы (около 17%) и используется для теплоизоляции высокотемпературного блока.

⁹ Ecoinvent database version 3.8. Режим доступа: <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.8> (дата обращения: 03.06.2025)

¹⁰ Magnesium Oxide Building Materials Learn all about magnesium oxide and why it is a unique building material. Режим доступа: <https://magox.com/wp-content/uploads/2019/01/MAGOX-CO2-Footprint-infographic.pdf> (дата обращения: 12.04.2025).

¹¹ Achieving a lower carbon footprint with Axion Polymers. Режим доступа: <https://www.buildingtalk.com/achieving-a-lower-carbon-footprint-with-axion-polymers/> (дата обращения: 10.04.2025).

¹² How environmentally friendly is polycarbonate? Режим доступа: <https://www.reptileknowledge.com/reptile-pedia/how-environmentally-friendly-is-polycarbonate> (дата обращения: 12.04.2025).

¹³ Nylon 6/6 glass fiber reinforced (PA66-GF). Режим доступа: https://sustainabilityworkshop.venturewell.org/sites/default/files/gallery-files/aircreation_materialdata_pa66-gf.pdf (дата обращения: 12.04.2025).

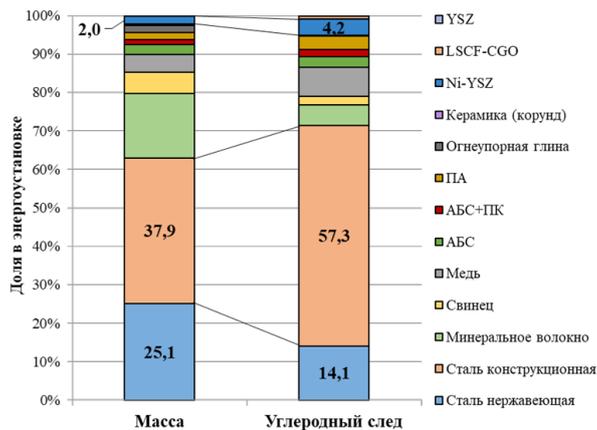


Рис. 4. Вклад материалов в углеродный след при производстве энергоустановки на основе ТОТЭ
 Fig. 4. Contribution of materials to the carbon footprint of a SOFC power plant

Величина углеродного следа при производстве основных материалов определяется большим набором факторов, таких как технологии и метод производства, вид сырья (первичное или вторичное), источник энергии и т.д. [4]. Для определения вклада конструкционных материалов в углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ была выполнена оценка содержания материалов и выбросов ПГ при их производстве (табл. 1 и рис. 4).

Оценка выбросов ПГ при производстве энергоустановки на основе ТОТЭ позволила определить вклад отдельных используемых материалов. При производстве энергоустановки основной вклад в углеродный след вносят конструкционная (57,3%) и нержавеющая стали (14,1%). Значительный вклад в углеродный след (4,2%) также вносят керамические материалы (Ni-YSZ), используемые для изготовления анода в батарее ТОТЭ. На долю меди, использованной при производстве систем управления (САУ и блок управления), приходится 7,6% углеродного следа производства установки.

Помимо производства материалов на углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ влияют процессы обработки материалов, расход энергетических ресурсов, необходимых для сборки. По данным [15], углеродный след при сборке и монтаже энергоустановки на основе ТОТЭ составляет около 27% от полного углеродного следа производства установки.

Этап эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ включает процессы производства и использования топлива. В данном исследовании проводилась оценка по трем вариантам топлива: природный газ, водородсодержащее топливо (ВСТ), состоящее из 80% метана и 20% водорода, и водород. В рамках производственного цикла топлива учитывались этапы добычи сырья и использования различных ресурсов, таких как электроэнергия, вода и топливо [4].

Выбросы ПГ при использовании природного газа в энергоустановке оценивались на основе расхода, компонентного состава топлива, углеродного следа его добычи (60,6 г CO₂-экв./кВт*ч) и конверсии топлива, включающей генерацию синтез-газа методом парового риформинга и его электрохимическое окисление на топливных ячейках ТОТЭ (307 г CO₂-экв./кВт*ч) [26, 31, 32]. Выбросы ПГ, образуемых при эксплуатации энергоустановки на водородном топливе, проводилась с учетом расхода водорода¹⁴ и углеродного следа водорода (197,7 г CO₂-экв./кВт*ч) [33].

На рис. 5 представлен углеродный след этапа эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ на различных видах топлива.

Анализ полученных данных об углеродном следе этапа эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ показал, что наибольший углеродный след связан с производством и использованием природного газа (367 г CO₂-экв./кВт*ч). Использование ВСТ в энергоустановке способствует



Рис. 5. Углеродный след этапа эксплуатации энергоустановки на основе ТОТЭ на различных видах топлива
 Fig. 5. Carbon footprint of the operational stage of a SOFC power plant on different types of fuel

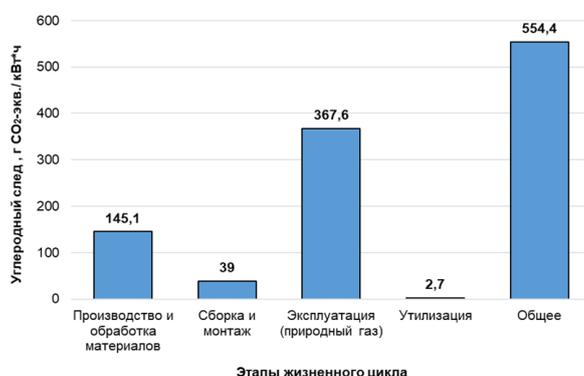


Рис. 6. Углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ по этапам жизненного цикла
 Fig. 6. Carbon footprint of a SOFC power plant by life cycle stages

снижению потребления топлива и углеродного следа на 20% по сравнению с выбросами ПГ от использования природного газа. Наибольший углеродный след связан с производством водорода (197,7 г CO_2 -экв./кВт*ч) [31]. Однако преимуществом является то, что использование водорода в энергоустановке не приводит к прямым выбросам ПГ.

Этап утилизации энергоустановки на основе ТОТЭ связан с мероприятиями по обращению с отходами по окончании срока ее эксплуатации. Около 70% материалов, используемых для изготовления энергоустановки, подлежат вторичной переработке согласно рекомендациям производителей. Этап утилизации энергоустановки на основе ТОТЭ, по данным исследований [18], составляет 0,5% от общего углеродного следа.

На рис. 6 представлен углеродный след энергоустановки на основе ТОТЭ по этапам жизненного цикла.

Анализ полученных данных об углеродном следе на этапах жизненного цикла энергоустановки показал, что наибольшее воздействие на окружающую среду оказывает этап эксплуатации, который составляет около 70% от общего углеродного следа. Углеродный след этапа эксплуатации энергоустановки может быть снижен при использовании водородного топлива на 32% (до 385 г CO_2 -экв./кВт*ч). Углеродный след производства энергоустановки составил 145,1 г CO_2 -экв./кВт*ч, большая часть которого пришлась на производство необходимых материалов. Наименьший углеродный след среди рассмотренных этапов жизненного цикла составил этап

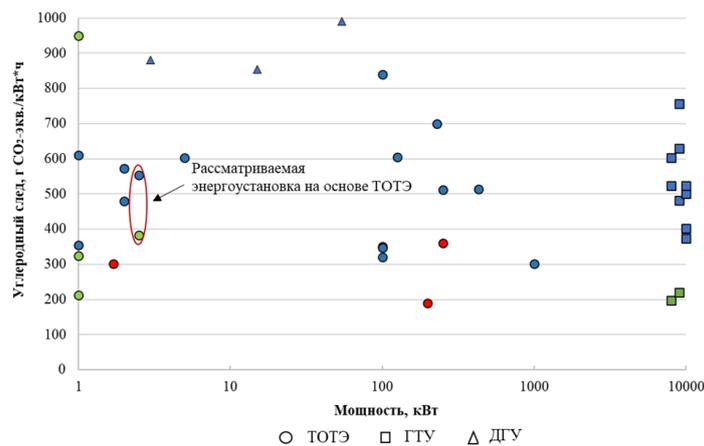


Рис. 7. Углеродный след электроэнергии, производимой энергетическими установками в зависимости от мощности (вид топлива: синий – ископаемое топливо, красный – биотопливо, зеленый – водород)

Fig. 7. Carbon footprint of electricity produced by power plants depending on capacity (fuel type: blue – fossil fuel, red – biofuel, green – hydrogen)

утилизации – 2,7 г СО₂-экв./кВт*ч.

Обсуждение

Для сравнения результатов оценки углеродного следа энергоустановки на основе ТОТЭ были использованы данные исследований по другим энергетическим установкам – газотурбинным (ГТУ) и дизельным генераторным (ДГУ) – с различной мощностью на разных видах топлива (рис. 7) [1, 5–24, 34–36].

Как следует из рис. 7, нет четкой корреляции между удельными выбросами ПГ и мощностью энергетических установок. Это может быть объяснено как разницей в конструкциях самих установок (различные количества материалов, особенности производственных процессов, виды топлива, источники энергии, расходы производственных ресурсов и т.д.), так и тем, что сама оценка жизненного цикла выполнена с разной детализацией и учтенными параметрами.

По результатам исследований [1, 5–10, 18, 20, 22–24] углеродного следа электроэнергии, вырабатываемой энергоустановками, работающими на природном газе, было определено, что на этап производства установок приходится 30–345 г СО₂-экв./кВт*ч, что составляет около 30% от общих выбросов СО₂, на этап эксплуатации – 213–569 г СО₂-экв./кВт*ч. Наиболее высокий углеродный след производимой электроэнергии был установлен при использовании ДГУ – 880–990 г СО₂-экв./кВт*ч [34–36].

Выбросы ПГ энергоустановок на основе ТОТЭ малой мощности (1 кВт), работающие на водородном топливе, составляют 210–950 г СО₂-экв./кВт*ч [12, 17, 21] и зависят в основном от способа производства водорода. Использование водорода в топливной смеси в энергетических установках будет перспективным, если для производства водорода будут использоваться низкоуглеродные источники энергии или применяться технологии улавливания и секвестрации углерода.

По данным исследований [11, 13–16, 19], углеродный след электроэнергии, вырабатываемой энергоустановками на основе ТОТЭ и ГТУ с использованием биотоплива, ниже, чем при использовании ископаемого топлива, и составляет 203–360 г СО₂-экв./кВт*ч.

Полученные результаты собственных исследований по оценке углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт сопоставимы с углеродным следом других энергоустановок. Увеличение срока службы рассматриваемой энергоустановки

за счет регулярного сервиса и замены составляющих, использования качественных материалов позволит сократить выбросы ПГ ввиду снижения углеродного следа 1 кВт*ч вырабатываемой электроэнергии.

Выводы

В настоящее время энергетические установки на основе ТОТЭ рассматриваются как перспективные объекты малой генерации, так как не имеют территориальных и климатических ограничений в отличие от ветрогенераторов или солнечных панелей, могут обеспечивать меньшие удельные выбросы ПГ на единицу генерируемой энергии по сравнению с другими установками, использующими ископаемое топливо, так как имеют более высокий КПД (до 70% по электрической энергии).

На основании оценки углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт было определено, что основной вклад вносит этап эксплуатации (около 70%), при этом общий углеродный след составил 554,4 г CO₂-экв./кВт*ч. Соответственно, выбросы ПГ энергоустановки определяются видом используемого топлива. Наиболее перспективным видом топлива для энергоустановок является водород, полученный с использованием низкоуглеродных источников энергии, или биотопливо.

Результаты оценки углеродного следа рассматриваемой энергоустановки на основе ТОТЭ мощностью 2,5 кВт показывают, что полученные значения углеродного следа сопоставимы с данными по другим энергоустановкам. Следовательно, рассматриваемая энергоустановка на основе ТОТЭ может быть эффективна в контексте снижения выбросов ПГ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Smith L., Ibn-Mohammed T., Yang F., Reaney I.M., Sinclair D.C., Lenny Koh S.C.** Comparative environmental profile assessments of commercial and novel material structures for solid oxide fuel cells, *Applied Energy*, 235 (2019) 1300–1313. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.028

[2] **Tsvetkov P., Andreichyk A., Kosarev O.** The impact of economic development of primary and secondary industries on national CO₂ emissions: The case of Russian regions, *Journal of Environmental Management*, 351 (2024) 119881. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119881

[3] **Ширинкина Е.С., Ильиных Г.В., Мозжегорова Ю.В., Коротаев В.Н.** Проблемы оценки жизненного цикла и углеродного следа водорода // *Экология и промышленность России*. 2023. Т. 27, № 12. С. 48–55. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-12-48-55

[4] **Mozzhegorova Y., Pinykh G., Korotaev V.** Life Cycle Assessment of a gas turbine installation, *Energies*, 17 (2024) 345. DOI: 10.3390/en17020345

[5] **Staffell I., Ingram A., Kendall K.** Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (3) (2012) 2509–2523. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.060

[6] **Shen Y., Yang Y., Song L., Lei T.** Environmental impact assessment of solid oxide fuel cell power generation system based on Life Cycle Assessment – A case study in China, *Sustainability*, 16 (9) (2024) 3863. DOI: 10.3390/su16093863

[7] **Baratto F., Diwekar U.M.** Life Cycle Assessment of fuel cell-based APUs, *Journal of Power Sources*, 139 (1–2) (2005) 188–196. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.07.025

[8] **Nease J., Adams T.A.** Life cycle analyses of bulk-scale solid oxide fuel cell power plants and comparisons to the natural gas combined cycle, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93 (8) (2015) 1349–1363. DOI: 10.1002/cjce.22207

- [9] **Pehnt M.** Environmental impacts of distributed energy systems – The case of micro cogeneration, *Environmental Science & Policy*, 11 (1) (2008) 25–37. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.07.001
- [10] **Safaei A., Freire F., Henggeler Antunes C.** A life cycle multi-objective economic and environmental assessment of distributed generation in buildings, *Energy Conversion and Management*, 97 (2015) 420–427. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.03.048
- [11] **Shafie S.M., Othman Z., Nu'man A.H., Yusuf N.N.A.N.** A model of life cycle on biogas feed to solid oxide fuel cell in Malaysia: Economic and environmental perspective, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 86 (2) (2024) 126–135.
- [12] **Bouramdane A.-A.** Assessing the environmental impact of hydrogen fuel cell technologies (PEMFCs, SOFCs, AFCs): A cradle-to-gate attributional life cycle analysis, *Green Economics*, 1 (2) (2023) 82–110.
- [13] **Gandiglio M., De Sario F., Lanzini A., Bobba S., Santarelli M., Blengini G.A.** Life Cycle Assessment of a biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) integrated in a wastewater treatment plant, *Energies*, 12 (9) (2019) 1611. DOI: 10.3390/en12091611
- [14] **Moretti C., Corona B., Rühlin V., Götz T., Junginger M., Brunner T., Obernberger I., Shen L.** Combining biomass gasification and Solid Oxid Fuel Cell for heat and power generation: An early-stage Life Cycle Assessment, *Energies*, 13 (11) (2020) 2773. DOI: 10.3390/en13112773
- [15] **Al-Khori K., Al-Ghamdi S.G., Boulfrad S., Koç M.** Life Cycle Assessment for integration of Solid Oxide Fuel Cells into gas processing operations, *Energies*, 14 (2021) 466. DOI: 10.3390/en14154668
- [16] **Rillo E., Gandiglio M., Lanzini A., Bobba S., Santarelli M., Blengini G.** Life Cycle Assessment (LCA) of biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) plant, *Energy*, 126 (2017) 585–602. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.041
- [17] **Cheng J., Lavery R., McCallum C.** Life Cycle Assessment of a Hydrogen Economy ready energy system for use in current day marine transport. ETP 9th Annual Conference, (2020).
- [18] **Strazza C., Del Borghi A., Costamagna P., Gallo M., Brignole E., Girdinio P.** Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation, *Energy Conversion and Management*, 100 (2015) 64–77. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.04.068
- [19] **Sadhukhan J.** Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches, *Applied Energy*, 122 (2014) 196–206. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.051
- [20] **Zhang D., Evangelisti S., Lettieri P., Papageorgiou L.G.** Optimal design of CHP-based microgrids: Multi-objective optimisation and Life Cycle Assessment, *Energy*, 85 (2015) 1–13. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.036
- [21] **Roy D., Samanta S., Roy S., Smallbone A., Roskillya A.P.** Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based energy systems for decarbonising residential power and heat in the United Kingdom, *Green Chemistry*, 26 (2024) 3979–3994. DOI: 10.1039/D3GC02645K
- [22] **Mehmeti A., McPhail S.J., Pumiglia D., Carlini M.** Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications, *Journal of Power Sources*, 325 (2016) 772–785. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.078
- [23] **Birnbaum K.U., Steinberger-Wilkens R., Zapp P.** Solid Oxide Fuel cells sustainability aspects. In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (ed. R.A. Meyers), (2012) 9934–9978. DOI: 10.1007/978-1-4419-0851-3_140
- [24] Lee Y.D., Ahn K.Y., Morosuk T., Tsatsaronis G., Environmental impact assessment of a solid-oxide fuel-cell-based combined-heat-and-power-generation system, *Energy*, 79 (2015) 455–466. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.035
- [25] **Вялых И.А., Кондрашов Н.Н., Коротаев В.Н., Арасланов Р.Д., Галлямов А.Н., Долгих А.В., Власов С.А., Любимов А.В.** Проектирование опытной энергетической установки на ТОТЭ мощностью 2,5 кВт // Водород как основа низкоуглеродной экономики. 2024. С. 51–52.
- [26] **Долгих А.В., Коротаев В.Н., Самойлов А.В., Вялых И.А., Арасланов Р.Д.** Сравнение способов получения синтез-газа при проектировании энергоустановок на твердооксидных топливных элементах //

XI Всероссийская конференция «Топливные элементы и энергоустановки на их основе»: Сборник трудов. 2024. С. 59–61.

[27] **Гончаров М.М., Краузин П.В., Кондрашов А.Н., Любимов А.В., Арасланов Р.Д., Долгих А.В., Кондрашов Н.Н., Коротаев В.Н., Вялых И.А.** Оптимизация математической модели реактора парового риформинга энергетической установки на ТОГЭ // Водород как основа низкоуглеродной экономики. 2024. С. 27–28.

[28] **Islam K., Motoshita M., Murakami S.** Environmental sustainability of bricks in an emerging economy: Current environmental hotspots and mitigation potentials for the future, *Sustainability*, 15 (6) (2023) 5228. DOI: 10.3390/su15065228

[29] Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the ceramics industry. 2009. 36 p.

[30] **Davidson A.J., Binks S.P., Gediga J.** Lead industry life cycle studies: Environmental impact and Life Cycle Assessment of lead battery and architectural sheet production, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (2016) 1624–1636. DOI: 10.1007/s11367-015-1021-5

[31] **Мозжегорова Ю.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н.** Оценка жизненного цикла газотурбинной установки в Российской Федерации // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 74–87. DOI: 10.18721/JEST.30204

[32] **Faramawy S., Zaki T., Sakr A.A.-E.** Natural gas origin, composition, and processing: A review, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34 (2016) 34–54. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.030

[33] **Lim D., Kim A., Cheon S., Byun M., Lim H.** Life cycle techno-economic and carbon footprint analysis of H₂ production via NH₃ decomposition: A Case study for the Republic of Korea, *Energy Conversion and Management*, 250 (2021) 114881. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114881

[34] **Bionaz D., Marocco P., Ferrero D., Sundseth K., Santarelli M.** Life cycle environmental analysis of a hydrogen-based energy storage system for remote applications, *Energy Reports*, 8 (2022) 5080–5092. DOI: 10.1016/j.egy.2022.03.181

[35] **Sopha B.M., Ma'mun S.** Economic analysis and environmental assessment of aluminum debris power generator for deployment to communal-scale disaster areas, *Heliyon*, 7 (2021) e07264. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07264

[36] **Brucoli M., Steele K., Hamelmann C., Jagne E., Mukarakate D.** Off-grid power supply carbon footprint and sustainable energy planning of primary health facilities.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МОЗЖЕГОРОВА Юлия Владимировна – доцент, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, канд. техн. наук.*

E-mail: juliagubaha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3081-9511>

ИЛЬИНЫХ Галина Викторовна – доцент, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, канд. техн. наук.*

E-mail: galina.perm.59@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8829-3500>

КОРОТАЕВ Владимир Николаевич – профессор, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, д-р техн. наук.*

E-mail: korotaev@pstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9941-7052>

REFERENCES

- [1] **L. Smith, T. Ibn-Mohammed, F. Yang, I.M. Reaney, D.C. Sinclair, S.C. Lenny Koh**, Comparative environmental profile assessments of commercial and novel material structures for solid oxide fuel cells, *Applied Energy*, 235 (2019) 1300–1313. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.028
- [2] **P. Tsvetkov, A. Andreichyk, O. Kosarev**, The impact of economic development of primary and secondary industries on national CO₂ emissions: The case of Russian regions, *Journal of Environmental Management*, 351 (2024) 119881. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119881
- [3] **E. Shirinkina, G. Ilinykh, Yu. Mozzhegorova, V. Korotaev**, Challenges in Life Cycle Assessment and carbon footprint of hydrogen, *Ecology and Industry of Russia*, 27(12) (2023) 48–55. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-12-48-55
- [4] **Y. Mozzhegorova, G. Ilinykh, V. Korotaev**, Life Cycle Assessment of a gas turbine installation, *Energies*, 17 (2024) 345. DOI: 10.3390/en17020345
- [5] **I. Staffell, A. Ingram, K. Kendall**, Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (3) (2012) 2509–2523. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.060
- [6] **Y. Shen, Y. Yang, L. Song, T. Lei**, Environmental impact assessment of solid oxide fuel cell power generation system based on Life Cycle Assessment – A case study in China, *Sustainability*, 16 (9) (2024) 3863. DOI: 10.3390/su16093863
- [7] **F. Baratto, U.M. Diwekar**, Life Cycle Assessment of fuel cell-based APUs, *Journal of Power Sources*, 139 (1–2) (2005) 188–196. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.07.025
- [8] **J. Nease, T.A. Adams**, Life cycle analyses of bulk-scale solid oxide fuel cell power plants and comparisons to the natural gas combined cycle, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93 (8) (2015) 1349–1363. DOI: 10.1002/cjce.22207
- [9] **M. Pehnt**, Environmental impacts of distributed energy systems – The case of micro cogeneration, *Environmental Science & Policy*, 11 (1) (2008) 25–37. DOI: 10.1016/j.envsci.2007.07.001
- [10] **A. Safaei, F. Freire, C. Henggeler Antunes**, A life cycle multi-objective economic and environmental assessment of distributed generation in buildings, *Energy Conversion and Management*, 97 (2015) 420–427. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.03.048
- [11] **S.M. Shafie, Z. Othman, A.H. Nu'man, N.N.A.N. Yusuf**, A model of life cycle on biogas feed to solid oxide fuel cell in Malaysia: Economic and environmental perspective, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 86 (2) (2024) 126–135.
- [12] **A.-A. Bouramdane**, Assessing the environmental impact of hydrogen fuel cell technologies (PEM-FCs, SOFCs, AFCs): A cradle-to-gate attributional life cycle analysis, *Green Economics*, 1 (2) (2023) 82–110.
- [13] **M. Gandiglio, F. De Sario, A. Lanzini, S. Bobba, M. Santarelli, G.A. Blengini**, Life Cycle Assessment of a biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) integrated in a wastewater treatment plant, *Energies*, 12 (9) (2019) 1611. DOI: 10.3390/en12091611
- [14] **C. Moretti, B. Corona, V. Rühlin, T. Götz, M. Junginger, T. Brunner, I. Obernberger, L. Shen**, Combining biomass gasification and Solid Oxid Fuel Cell for heat and power generation: An early-stage Life Cycle Assessment, *Energies*, 13 (11) (2020) 2773. DOI: 10.3390/en13112773
- [15] **K. Al-Khori, S.G. Al-Ghamdi, S. Boulfrad, M. Koç**, Life Cycle Assessment for integration of Solid Oxide Fuel Cells into gas processing operations, *Energies*, 14 (2021) 466. DOI: 10.3390/en14154668
- [16] **E. Rillo, M. Gandiglio, A. Lanzini, S. Bobba, M. Santarelli, G. Blengini**, Life Cycle Assessment (LCA) of biogas-fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) plant, *Energy*, 126 (2017) 585–602. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.041
- [17] **J. Cheng, R. Lavery, C. McCallum**, Life Cycle Assessment of a Hydrogen Economy ready energy system for use in current day marine transport. ETP 9th Annual Conference, (2020).

- [18] **C. Strazza, A. Del Borghi, P. Costamagna, M. Gallo, E. Brignole, P. Girdinio**, Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation, *Energy Conversion and Management*, 100 (2015) 64–77. DOI: 10.1016/j.enconman.2015.04.068
- [19] **J. Sadhukhan**, Distributed and micro-generation from biogas and agricultural application of sewage sludge: Comparative environmental performance analysis using life cycle approaches, *Applied Energy*, 122 (2014) 196–206. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.051
- [20] **D. Zhang, S. Evangelisti, P. Lettieri, L.G. Papageorgiou**, Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and Life Cycle Assessment, *Energy*, 85 (2015) 1–13. DOI: 10.1016/j.energy.2015.03.036
- [21] **D. Roy, S. Samanta, S. Roy, A. Smallbone, A.P. Roskillya**, Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based energy systems for decarbonising residential power and heat in the United Kingdom, *Green Chemistry*, 26 (2024) 3979–3994. DOI: 10.1039/D3GC02645K
- [22] **A. Mehmeti, S.J. McPhail, D. Pumiglia, M. Carlini**, Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications, *Journal of Power Sources*, 325 (2016) 772–785. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.078
- [23] **K.U. Birnbaum, R. Steinberger-Wilkens, P. Zapp**, Solid Oxide Fuel cells sustainability aspects. In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (ed. R.A. Meyers), (2012) 9934–9978. DOI: 10.1007/978-1-4419-0851-3_140
- [24] **Y.D. Lee, K.Y. Ahn, T. Morosuk, G. Tsatsaronis**, Environmental impact assessment of a solid-oxide fuel-cell-based combined-heat-and-power-generation system, *Energy*, 79 (2015) 455–466. DOI: 10.1016/j.energy.2014.11.035
- [25] **I.A. Vialykh, N.N. Kondrashov, V.N. Korotaev, R.D. Araslanov, A.N. Galliamov, A.V. Dolgikh, S.A. Vlasov, A.V. Liubimov**, Proektirovanie opytnoi energeticheskoi ustanovki na TOTE moshchnost'iu 2,5 kVt [Design of a pilot power plant on SOFC with a capacity of 2.5 kW], *Vodorod kak osnova nizkouglerodnoi ekonomiki* [Hydrogen as the basis of a low-carbon economy], (2024) 51–52.
- [26] **A.V. Dolgikh, V.N. Korotaev, A.V. Samoilov, I.A. Vyalykh, R.D. Araslanov**, Comparison of synthesis gas production methods for designing power units on solid oxide fuel cells, 11th All-Russian Conference “Fuel Cells and Power Plants Based on Them”, (2024) 59–61.
- [27] **M.M. Goncharov, P.V. Krauzin, A.N. Kondrashov, A.V. Liubimov, R.D. Araslanov, A.V. Dolgikh, N.N. Kondrashov, V.N. Korotaev, I.A. Vialykh**, Optimizatsiia matematicheskoi modeli reaktora parovogo riforminga energeticheskoi ustanovki na TOTE [Optimization of the Mathematical Model of the Steam Reforming Reactor of the SOFC Power Plant], *Vodorod kak osnova nizkouglerodnoi ekonomiki* [Hydrogen as the basis of a low-carbon economy], (2024) 27–28.
- [28] **K. Islam, M. Motoshita, S. Murakami**, Environmental sustainability of bricks in an emerging economy: Current environmental hotspots and mitigation potentials for the future, *Sustainability*, 15 (6) (2023) 5228. DOI: 10.3390/su15065228
- [29] Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012. Sector report for the ceramics industry. 2009. 36 p.
- [30] **A.J. Davidson, S.P. Binks, J. Gediga**, Lead industry life cycle studies: Environmental impact and Life Cycle Assessment of lead battery and architectural sheet production, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21 (2016) 1624–1636. DOI: 10.1007/s11367-015-1021-5
- [31] **Yu.V. Mozhgorova, G.V. Ilinykh, V.N. Korotaev**, Life cycle assessment of a gas turbine installation in the Russian Federation, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 74–87. DOI: 10.18721/JEST.30204
- [32] **S. Faramawy, T. Zaki, A.A.-E. Sakr**, Natural gas origin, composition, and processing: A review, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34 (2016) 34–54. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.06.030
- [33] **D. Lim, A. Kim, S. Cheon, M. Byun, H. Lim**, Life cycle techno-economic and carbon footprint analysis of H₂ production via NH₃ decomposition: A Case study for the Republic of Korea, *Energy Conversion and Management*, 250 (2021) 114881. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114881

[34] **D. Bionaz, P. Marocco, D. Ferrero, K. Sundseth, M. Santarelli**, Life cycle environmental analysis of a hydrogen-based energy storage system for remote applications, *Energy Reports*, 8 (2022) 5080–5092. DOI: 10.1016/j.egy.2022.03.181

[35] **B.M. Sopha, S. Ma'mun**, Economic analysis and environmental assessment of aluminum debris power generator for deployment to communal-scale disaster areas, *Heliyon*, 7 (2021) e07264. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07264

[36] **M. Brucoli, K. Steele, C. Hamelmann, E. Jagne, D. Mukarakate**, Off-grid power supply carbon footprint and sustainable energy planning of primary health facilities.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Yulia V. MOZZHEGOROVA – *Perm National Research Polytechnic University*.

E-mail: juliagubaha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3081-9511>

Galina V. ILINYKH – *Perm National Research Polytechnic University*.

E-mail: galina.perm.59@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8829-3500>

Vladimir N. KOROTAEV – *Perm National Research Polytechnic University*.

E-mail: korotaev@pstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9941-7052>

Поступила: 30.04.2025; Одобрена: 20.05.2025; Принята: 27.05.2025.

Submitted: 30.04.2025; Approved: 20.05.2025; Accepted: 27.05.2025.

Научная статья

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31205>



*Е.Ф. Кади-Оглы*¹ ✉, *Н.В. Коровкин*²

¹ «Турбинные технологии ААЭМ», Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ТОКОВ, ПОТЕРЬ И ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ В СТЕРЖНЕВОЙ ОБМОТКЕ ЯКОРЯ С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ СПРЯМЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Аннотация. В статье изложена методика расчета распределения магнитного поля, токов, потерь и индуктивных сопротивлений рассеяния в пазовой зоне стержневых обмоток якоря машин переменного тока с косвенным охлаждением, основанная на моделировании магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с учетом электрической цепи. Используемая методика учитывает транспозицию элементарных проводников стержней по длине пазовой части, расположение стержней в пазу статора, особенности пазовой геометрии машины и схему соединения обмотки якоря, что дает возможность моделировать различные режимы работы обмотки. Она реализована на основании спрямленной модели обобщенной электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения. Сравнительный анализ результатов расчета показывает приемлемость предлагаемой методики, а методика может быть рекомендована при расчете различных режимов, потерь и индуктивных сопротивлений транспонированных обмоток переменного тока при проектировании и анализе электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением.

Ключевые слова: электрическая машина, обмотка якоря с косвенным охлаждением, транспозиция элементарных проводников, магнитное поле переменных токов, элементарные проводники, цепно-полевая постановка, потери, индуктивные сопротивления рассеяния, спрямленная модель электрической машины.

Для цитирования:

Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов, потерь и индуктивности рассеяния в стержневой обмотке якоря с косвенным охлаждением электрической машины переменного тока на основе спрямленной модели // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 57–69. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31205>



*E.F. Kadi-Ogly*¹ ✉, *N.V. Korovkin*²

¹ “Turbine Technology AAEM”, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

CALCULATION METHOD FOR MAGNETIC FIELD, CURRENTS, LOSSES, AND LEAKAGE REACTANCE IN THE BAR-TYPE ARMATURE WINDING OF INDIRECTLY COOLED AC ELECTRICAL MACHINE BASED ON STRAIGHTEN MODEL

Abstract. The paper describes a calculation method for the distribution of the magnetic field, currents, losses, and leakage reactances in the slot parts of bar-type armature winding of indirectly cooled AC electrical machines performed on the base of finite element method of AC magnetic field modeling in a 2D formulation considering electric circuit. The implemented method accounts for the transposition of the strands of the bars along the length of the slot part, the location of the bars in the stator slot, the features of the machine slot geometry and the diagram of armature winding connections, giving the opportunity to simulate different conditions of the winding operation. The method is based on straighten model of generalized electrical machine, which allows to simplify the problem without considerable loss of the solution accuracy. A comparative analysis of the calculation results demonstrates the acceptability of the proposed method. This method could be recommended for calculating various modes, losses and inductive reactances of transposed AC windings in the design and analysis of electrical machines with indirect cooling.

Keywords: electrical machine, armature winding with indirect cooling, strand transposition, AC magnetic field, strands, field-circuit formulation, losses, leakage reactances, straighten model of an electrical machine.

Citation:

Kadi-Ogly E.F., Korovkin N.V., Calculation method for magnetic field, currents, losses, and leakage reactance in the bar-type armature winding of indirectly cooled ac electrical machine based on straighten model, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 57–69, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31205>

Введение. Исследование электромагнитных процессов, основанных на анализе магнитных полей в активных частях крупных электрических машин, является актуальной задачей при конструировании современного электроэнергетического оборудования [1–3]. Наиболее важными при этом являются процессы в пазовых частях стержневых обмоток якорей, которые являются ключевыми с точки зрения энергетических и нагрузочных характеристик машины. Ряд фундаментальных работ отечественных и зарубежных авторов [4–6] базируется на анализе данных процессов аналитическими методами расчета. Современный этап развития электротехники характеризуется популярностью методов по решению данных задач в трехмерной постановке [7, 8, 10]. Однако методы расчета, основанные на исследовании магнитных полей переменного тока в плоской постановке с учетом электрической цепи, не утратили своей актуальности. Такие постановки являются значительно проще трехмерных, что важно при проведении многовариантных расчетов и оптимизационных исследований.

Целью настоящей работы являются оценка и выбор параметров режимов работы стержневых обмоток якоря мощных электрических машин с косвенным охлаждением, где базовой задачей является разработка методологии данных исследований.

В данной статье изложена методика расчета распределения магнитного поля, токов потерь и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния в пазовых частях стержневых обмоток якоря электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением, которая основана на моделировании магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с учетом электрической цепи [11–13]. Методика учитывает конструкцию и транспозицию элементарных проводников стержней по длине пазовой части, расположение стержней в пазах якоря, особенности пазовой геометрии машины с косвенным охлаждением и схему соединения обмотки якоря. Она основана на спрямленной модели электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения [13].

Сравнительный анализ результатов расчета конструкции обобщенной электрической машины переменного тока показывает приемлемость предлагаемой методики, которая может быть рекомендована при расчете потерь и индуктивных сопротивлений транспонированных обмоток якоря при проектировании и анализе электрических машин с косвенным охлаждением.

Постановка задачи

Данная методика основана на решении задачи магнитного поля переменных токов на базе уравнений Максвелла в комплексных переменных, где функции представляют собой комплексные отображения гармонически изменяющихся величин с постоянной частотой f [11–13].

В плоской постановке (x, y) задача формулируется в символах комплексного векторного магнитного потенциала:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega\gamma A = -\delta_{ext},$$

где A – комплексный векторный магнитный потенциал; $\delta_{ext} = \gamma E$ – комплексный вектор плотности стороннего тока; $\delta_{eddy} = j\omega\gamma A$ – комплексный вектор плотности вихревого тока; μ – тензор магнитной проницаемости среды (в общем случае зависит от координат и напряженности магнитного поля); γ – удельная электрическая проводимость среды (в общем случае зависит от температуры, а в трехмерной постановке – от направления координат); $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; j – мнимая единица.

В методике приняты допущения, применяемые для спрямленной модели обобщенной электрической машины переменного тока [13] с учетом обоснованных рекомендаций [12]. Кроме того, принимается допущение об однородности сердечника якоря – не учитывается его неоднородность по длине, определяемая изоляцией листов электротехнической стали и радиальными вентиляционными каналами. При необходимости это может быть учтено незначительной корректировкой методики [1, 2].

Построение математической модели

Параметры обобщенной электрической машины

Для разработки настоящей методики принята модель электрической машины переменного тока, имеющая обобщенные эквивалентные параметры, не отнесенные к конкретной машине, но учитывающие основные конструктивные и физические соотношения, применимые к якорям электрических машин переменного тока с многофазными стержневыми обмотками и косвенным охлаждением [1, 2]. Расчеты выполнены на основе обобщенной машины, которая имеет параметры, представленные в табл. 1.

Размеры поперечного сечения якоря обобщенной электрической машины приняты в соответствии с обоснованными положениями [12], размеры элементарных проводников – в соответствии

Таблица 1

Параметры обобщенной электрической машины

Table 1

Parameters of generalized electrical machine

Параметр	Величина	Размерность
Номинальное напряжение, U_n	10,5	кВ
Номинальный ток, I_n	1050	А
Соединение обмотки	звезда	
Число фаз обмотки якоря, m	3	
Число пазов якоря, Z_1	12	–
Число пар полюсов, $2p$	2	–
Укорочение обмотки	5/6	–
Число витков фазы обмотки, w	2	–
Число стержней в пазу, S_n	2	–
Число параллельных ветвей обмотки, a	2	–
Число элементарных проводников в стержне, G	12	–
Транспозиция пазовой части стержней	360	градусы
Высота паза якоря, h_n	49	мм
Ширина паза якоря, b_n	26	мм
Ширина элементарного проводника стержня, $a_{пр}$	10	мм
Высота элементарного проводника, $b_{пр}$	1,5	мм
Диаметр расточки якоря, D_1	198	мм
Внешний диаметр якоря, D_1'	378	мм
Воздушный зазор, δ	10	мм
Длина пазовой части якоря, L_z	1200	мм

с ГОСТ 22301-77 (актуализирован 06.04.2015), сечение стержней, количество элементарных проводников, элементы выкладки паза и их размеры (прокладки и клинья), размеры пазов и зубцов статора – в соответствии с рекомендациями [1, 2], толщина корпусной изоляции – в соответствии с [14]. Число проводников в верхнем и нижнем стержнях принимается одинаковым, но в практике высокоиспользуемых генераторов с косвенным охлаждением обмотки якоря число проводников в верхнем стержне может приниматься больше, чем в нижнем. Этот факт не является определяющим в настоящей работе, но может быть учтен в методике.

Особенности построения спрямленной модели

Для построения спрямленной модели приняты положения [13], что ширина модели соответствует длине окружности расточки якоря обобщенной машины πD_1 ; размеры пазов якоря соответствуют обобщенной машине, ширина зубца якоря соответствует его размеру на уровне расточки статора. Учитывается, что геометрические размеры пазов якоря и расположение в них элементарных проводников, а также их геометрия определяют распределение в них токов и удельных потерь [1, 2]. Количество сечений равно числу элементарных проводников стержней, транспонированных отдельно.

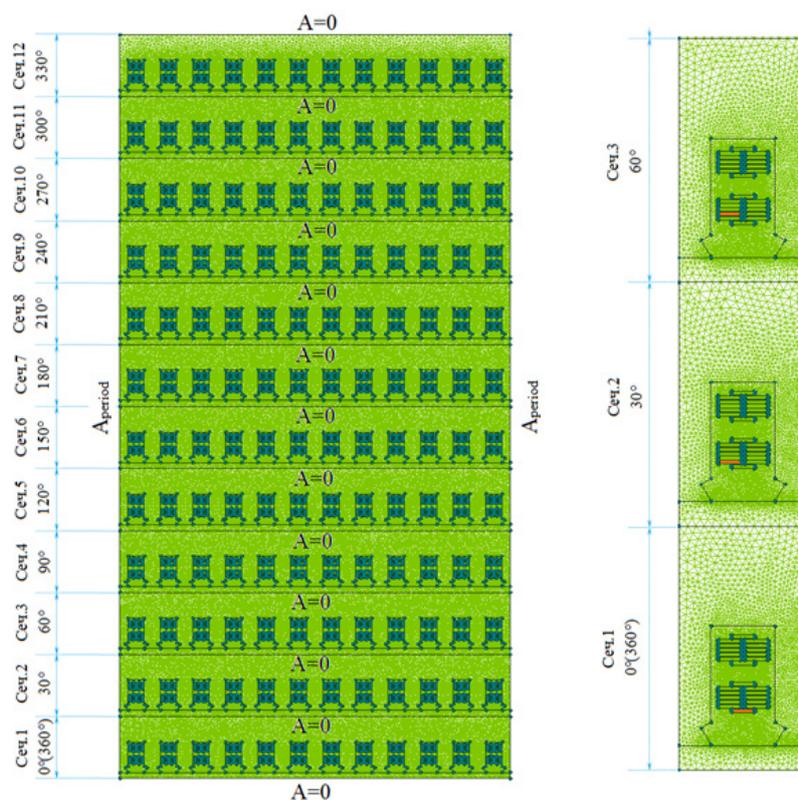


Рис. 1. Геометрическая модель и конечно-элементная дискретизация поперечного сечения спрямленной электрической машины переменного тока с многофазной стержневой обмоткой якоря с косвенным охлаждением

Fig. 1. Geometrical model and finite-element meshing of cross section of AC electrical machine with indirectly cooled multiphase armature winding

Построение конечно-элементной модели спрямленной машины с подключенной электрической цепью

Конечно-элементная модель данной задачи (рис. 1) включает 12 сечений. Каждое сечение дискретно моделирует участок, на котором определенные проводники в пределах своего стержня занимают положение в пазу в зависимости от их перемещения по длине якоря машины при транспозиции ($0, 30^\circ, \dots, 360^\circ$). В правой части рис. 1 показано расположение элементарного проводника при переходе с одного положения в другое при его транспозиции по длине стержня на участках транспозиции $0^\circ-60^\circ$. На верхней и нижней границах каждого сечения модели устанавливается граничное условие Дирихле равенства нулю нормальной составляющей поля ($A = 0$). На боковых границах модели устанавливаются периодические граничные условия (*Aperiod*).

Электрическая цепь осуществляет связь между сечениями, моделируя электрическое соединение между элементарными проводниками, расположенными в различных сечениях. Переходы при транспозиции элементарных проводников в рамках одного стержня происходят дискретно. На рис. 2 представлена электрическая цепь одной фазы обмотки, где:

$U^{+(-)}_{1,1,1}, \dots, U^{+(-)}_{n,k,m}, X^{+(-)}_{1,1,1}, \dots, X^{+(-)}_{n,k,m}$ – элементы фаз обмотки статора (в соответствии с правилами звезды U, V, W, X, Y, Z);

$+(-)$ – обозначение верхнего (нижнего) стержня в пазу, последовательно соединенного с стержнем $-(+)$;

$1, m$ – номера проводников в стержня, начиная с расположенного на верхней их части в сечении 1 ($0^\circ(360^\circ)$) (см. рис. 1). Всего проводников – G ;

$1, k$ – число последовательных витков в фазе обмотки якоря;

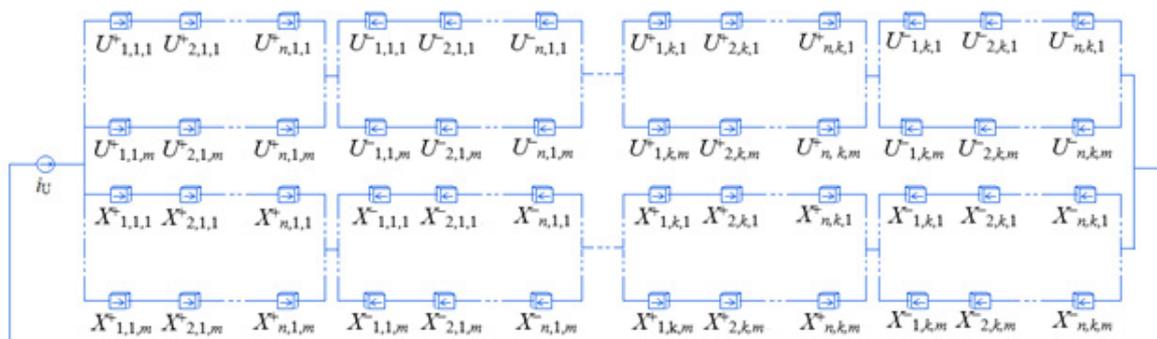


Рис. 2. Электрическая цепь одной фазы обмотки якоря

Fig. 2. Electrical circuit of armature winding single phase

$\overline{1, n}$ – номер сечения, определяемый углом транспозиции и количеством элементарных проводников в стержне.

Направление стрелок на элементах цепи указывает на их положительное или отрицательное подключение, что позволяет учесть направление тока в конкретном элементе модели, моделируя, что в диаметрально расположенных элементах витка обмотки направление токов противоположное.

На рис. 3 представлена электрическая цепь, сопряженная с конечно-элементной моделью и реализованная в программном комплексе ELCUT [9].

В данной модели электрическая цепь представляет собой 3 фазы, в каждой из которых содержится 1152 элемента, соединенных:

- последовательно в каждой ветви. Количество соответствует числу сечений – участков транспозиции с шагом 30° ;
- параллельно в составе стержня. Количество соответствует числу проводников в стержне;
- последовательно в составе фазы. Количество соответствует числу витков в фазе;
- параллельно в составе обмотки. Количество соответствует числу параллельных ветвей обмотки.

Фазы обмотки статора соединены в звезду и питаются от источников тока, которые имеют следующие параметры:

$$i_U = I_n \sqrt{2} \cos(\omega t); \quad i_V = I_n \sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); \quad i_W = I_n \sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).$$

Номер каждого проводника строго «привязан» к конкретному проводнику, обладающему заданными свойствами и расположенному в пространстве модели в определенном месте.

Анализ результатов расчета

На рис. 4 представлены результаты расчета распределения магнитного поля при начальных фазах по переменному току $0, \frac{\pi}{3}$ и $\frac{2\pi}{3}$ эл.град. Равномерное изменение (перемещение полюсов) распределения магнитного поля при его рассмотрении в различные моменты времени (при различных начальных фазах) иллюстрирует его перемещающийся (вращающийся) характер с частотой перемещения (вращения) $N = 60f/p$.

На рис. 5 представлена картина распределения магнитного поля и плотности тока в проводниках стержней в области первого паза первого сечения модели при начальной фазе 0 эл.град.

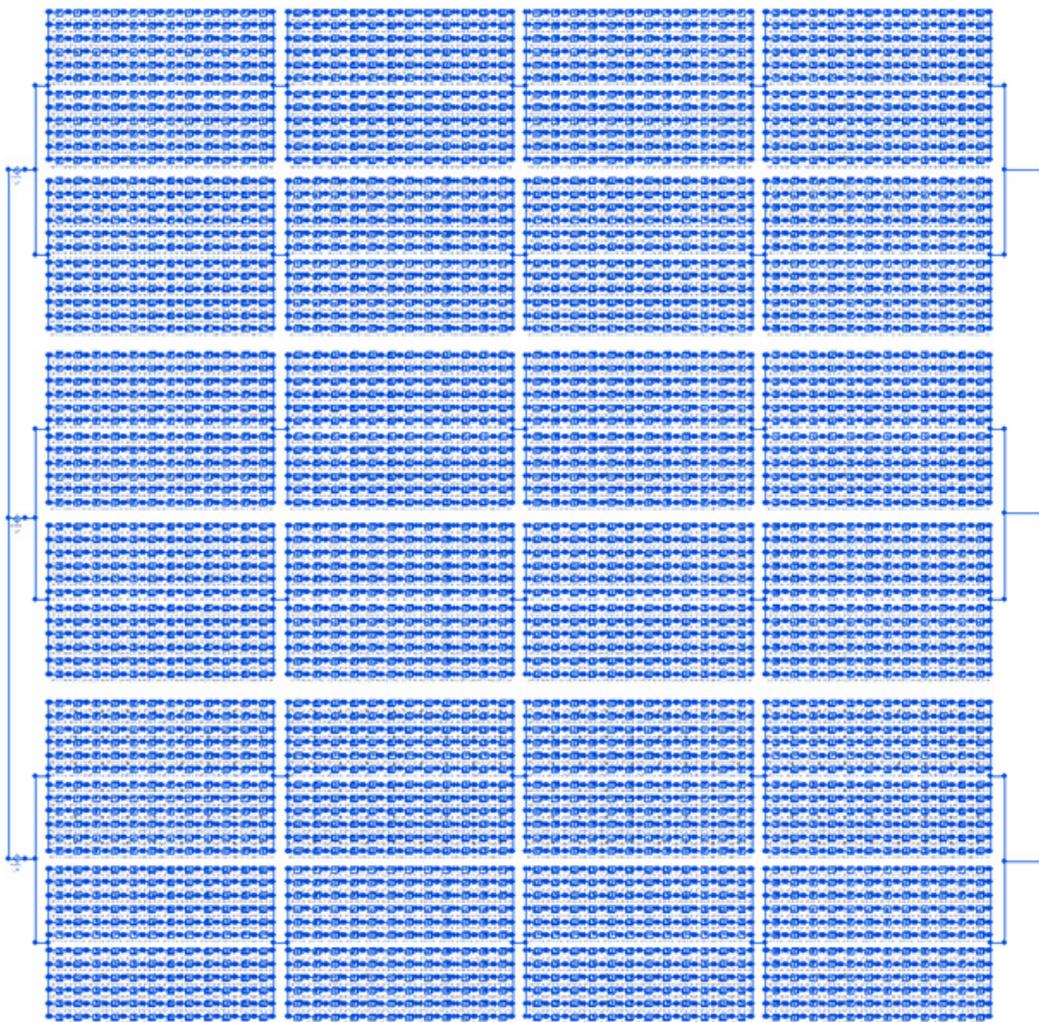


Рис. 3. Электрическая цепь модели, реализованная в программном комплексе ELCUT

Fig. 3. Electrical circuit of the model realized in ELCUT software

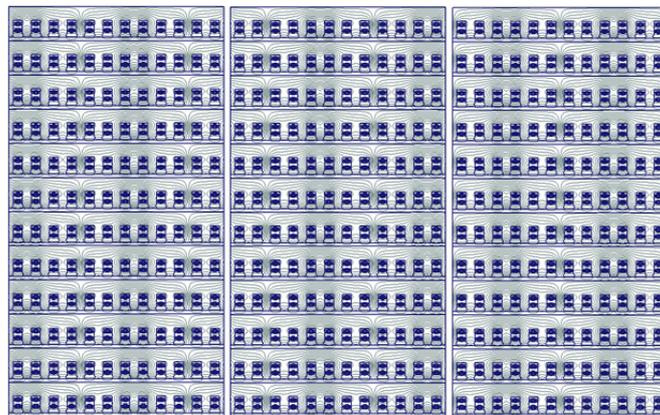


Рис. 4. Распределение магнитного поля при 0 , $\frac{\pi}{3}$ и $\frac{2\pi}{3}$ эл.град.

Fig. 4. Magnetic field pattern at 0 , $\frac{\pi}{3}$ and $\frac{2\pi}{3}$ elec.deg.

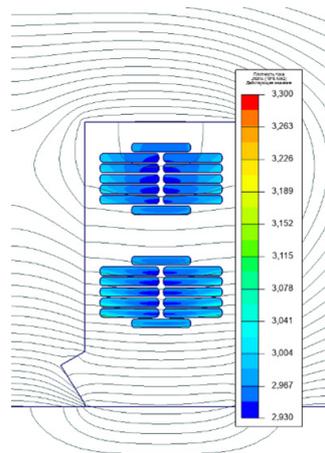


Рис. 5. Распределение плотности тока
Fig. 5. Pattern of current density

Распределение токов соответствует физическому представлению процессов в данном элементе конструкции электрической машины.

Результаты расчета показывают, что величина плотности тока находится в диапазоне 2,93–3,3 А/мм² и соответствует рекомендованным значениям [1, 2]. В пазовой зоне магнитное поле «практически» параллельно расточке статора, мгновенное значение тока в этот момент времени является максимальным в данном пазу, но распределение действующего значения токов во всех пазах одинаковое.

На рис. 6 представлены некоторые результаты расчета электрической цепи, сопряженной с конечно-элементной моделью, при начальной фазе 0 эл.град. Представлены действующее и мгновенные значения тока в фазе U , действующее значение тока через проводник $U_{1,1,1}^+$ и напряжения, приложенного к нему. Величина напряжения определяется параметрами каждого проводника в зависимости от его положения в пазу якоря, заданного для определенного сечения модели. Импеданс каждого проводника представляет из себя отношение комплексного значения напряжения, приложенного к каждому элементу цепи, к комплексному полному току, протекающему через него:

$$z = \dot{U}/\dot{I} = \text{Re}(z) + j \text{Im}(z),$$

где \dot{U} – комплексное значение напряжения, \dot{I} – комплексное значение тока, z – импеданс проводника. Действующие значения токов, протекающих в каждом k -м проводнике, равны между собой:

$$I_k = I/(a \cdot G),$$

где I – действующее значение фазного тока.

Следовательно, при $G = 12$, $a = 2$, $I = 1050$ А (табл. 1) ток через k -й проводник равен $I_k = 43,75$ А.

Важными параметрами электрической машины переменного тока являются потери в обмотке, определяющие энергетические показатели машины, коэффициенты вытеснения тока (Фильда), характеризующие степень добавочных потерь в обмотке, поток рассеяния обмотки, влияющий на величины индуктивности рассеяния, переходного и сверхпереходного индуктивных сопротивлений, которые определяют токи, электромагнитные нагрузки и постоянные времени в переходных режимах работы машины.

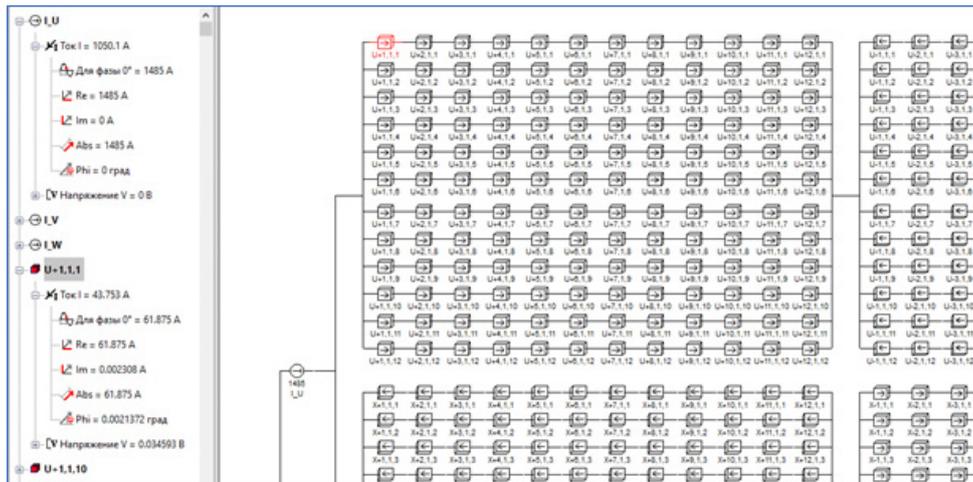


Рис. 6. Результаты расчета электрической цепи
 Fig. 6. Results of electrical circuit calculation

В настоящей методике потери в обмотке якоря (мощности тепловыделения) и коэффициенты Фильда определяются на основании расчета поля и методов, описанных в [11–13].

Поток пазового рассеяния Φ_n определяется путем интегрирования через контур, заданный по высоте паза от дна паза до нижней границы модели, включающий воздушный зазор машины, с учетом глубины каждого участка, ограниченного его сечениями модели.

Величина индуктивного сопротивления пазового рассеяния равна:

$$x_n = \omega \frac{\Phi_n w G^\circ}{I} \frac{I_n \sqrt{3}}{U_n},$$

где I – текущая величина фазного тока статора.

В табл. 2 представлены результаты расчета потерь, коэффициентов Фильда и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния, полученных из расчета поля и аналитически [2] для всей обмотки якоря. Ввиду симметричности обмотки якоря результаты расчета потерь для всех пазов якоря являются одинаковыми.

Таблица 2

Потери, коэффициенты Фильда и индуктивные сопротивления пазового рассеяния обмотки якоря

Table 2

Losses, Field's coefficients and slot leakage of armature winding

Тип расчета	Тип стержней якоря	Потери, кВт		Параметр	
		P_{\sim}	$P_{=}$	k_{Φ}	$X_{шк}, o.e.$
Цепно-полевой метод	Верхние стержни	4,772	4,714	1,012	$0,325 \cdot 10^{-3}$
	Нижние стержни	4,730	4,714	1,003	
Аналитический метод [2]	Верхние стержни	4,752	4,714	1,008	$0,327 \cdot 10^{-3}$
	Нижние стержни	4,719	4,714	1,001	

Заключение

1. В данной статье изложена методика расчета распределения токов, потерь и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния обмотки якоря электрической машины переменного тока с косвенным охлаждением на основе спрямленной модели, реализованной в отечественном программном комплексе ELCUT [9].

2. Методика обладает рядом важных преимуществ:

- над аналитическими методами, поскольку позволяет достаточно детально учесть локальные процессы в каждом элементарном проводнике и схему их транспозиции в пределах стержней, схему соединения стержней в обмотке и особенности питания обмотки якоря;

- над современными 3D-моделями, поскольку является математически более простой с точки зрения постановки, маневренной с точки зрения реализации режимов, позволяющей получить результат в наиболее короткие сроки, что является важным при выполнении многовариантных и оптимизационных расчетов.

3. Сравнительный анализ результатов расчета, выполненный для спрямленной модели якоря обобщенной электрической машины, показывает высокую эффективность и приемлемость предлагаемой методики, которая может быть рекомендована при расчете потерь транспонированных обмоток переменного тока при проектировании и анализе электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением. Погрешность расчета между полевым и аналитическим расчетами для потерь составляет 0,4% для верхних стержней и 0,2% — для нижних, а для индуктивных сопротивлений пазового рассеяния — 0,6%.

4. Методика позволяет моделировать не только симметричные, но несимметричные и установившиеся аварийные режимы обмотки якоря.

Дискуссия

Развитием данной модели может являться применение методов искусственного интеллекта для диагностики стержневых обмоток на этапах окончания изготовления, промышленной эксплуатации и при возможных неисправностях. Действительно, в рамках построенной модели можно выполнять моделирование любых замыканий между элементарными проводниками в 12 точках по длине стержня и между каждой парой соприкасающихся стержней. Возможно моделирование более сложных многостержневых замыканий. Каждое из замыканий незначительно изменяет параметры обмотки, которые рассчитываются в рамках рассмотренной методики. Далее группа рассчитанных вариантов замыканий используется для тренировки нейронной сети, которая по изменению параметров способна определять наиболее вероятное место замыкания. Ожидаемые относительные изменения параметров обмоток незначительны и оцениваются нами в доли процента от номинальных значений. Для проверки качества работы нейронной сети используется другая группа замыканий, в которых в рассматриваемой постановке задачи нет недостатка. Созданная, натренированная и проверенная таким образом нейронная сеть может использоваться при эксплуатации машины. Для этого необходима следящая за изменениями эквивалентных параметров измерительная система. Так как измерениям подлежит не сама величина, а ее изменение (дифференциальное измерение), то точность фиксации изменения параметров современными вычислительными средствами может быть весьма высока. Современные измерительные процессоры обеспечивают уровень относительной погрешности дифференциальных измерений $2^{-14} \sim 7 \cdot 10^{-4}$, или менее 0,1%. Соответственно, нейронная сеть будет показывать места появления замыканий между стержнями и место по длине стержней в реальном времени. Отметим также, что обучение, тестирование, а затем и использование нейронной сети могут выполняться и на более высокой частоте, что повысит чувствительность подхода. Авторы хорошо понимают огромный объем сложной работы, стоящий между высказыванием идеи и ее реализацией, но, тем не менее, считают необходимым указать на такую перспективную возможность использования разработанной в данной статье модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
- [2] Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. Л.: Энергия, 1967. 895 с.
- [3] Klemperer G., Kerzenbaum I. Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, NJ: IEEE Press, 800 p.
- [4] Haldemann J. Transposition in stator bars of large turbogenerators, IEEE Transactions on Energy Conversion, 19 (3) (2004) 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>
- [5] Iseli M.A., Reichert K., Neidhöfer G. Calculation of current distribution and stray losses in arbitrarily transposed stator coils, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, 2 (1988) 47–52.
- [6] Бобков Ю.А. Метод исследования транспозиции проводников стержня обмотки статора по обобщенным схемам // Электричество. 1987. № 8. С. 55–58.
- [7] Дергачев П.А., Венцеров М.С., Астафьев В.В. Моделирование потерь в пазовой части обмотки статора турбогенератора с транспозицией элементарных проводников // Интеллектуальная электротехника. 2023. Т. 24, № 4. С. 4–17. DOI: https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_4_04
- [8] Ryzhov V.V., Molokanov O.N., Dergachev P.A., Osipkin S.V., Kurbatova E.P., Kurbatov P.A. Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics, 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. 2014. № 10. С. 66–71.
- [10] Zhang L., Liang Y. A new four-row integral transposition method of stator windings and circulating current loss reduction in large turbo generators, IET Electric Power Applications, 17(1) (2023) 124–133. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12259>
- [11] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>
- [12] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В., Ильин И.В. Разработка методики расчета электромагнитного поля, токов и потерь в транспонированных стержнях обмотки якоря // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2024. № 3. С. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002331024030054>
- [13] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе спрямленной модели // Энергетик. 2024. № 9. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.71527/EP.EN.2024.09.001>
- [14] Ярошня Е.И., Пак В.М., Окнин Н.С., Погодина Ж.П. Разработка и исследование терморезистивной системы изоляции высоковольтных электрических машин // Электротехника. 1997. № 12. С. 40–45.
- [15] Selema A., Ibrahim M.N., Sergeant P. Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines, Machines, 10 (5) (2022) 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050328>
- [16] Hebala A., Nuzzo S., Connor P.H., Volpe G., Gerada C., Galea M. Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors, Machines, 10 (9) (2022) 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАДИ-ОГЛЫ Евгений Федорович — директор по электроэнергетическому оборудованию, «Турбинные технологии ААЭМ», канд. техн. наук.

E-mail: e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

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>

REFERENCES

- [1] **V.V. Dombrovskii, G.M. Khutoretskii**, *Osnovy proektirovaniia elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Fundamentals of designing AC electrical machines], Leningrad: Energiia, 1974. 504 p.
- [2] **V.V. Titov, G.M. Khutoretskii, G.A. Zagorodnaia et al.**, *Turbogeneratory. Raschet i konstruktsiia* [Turbogenerators. Calculation and design], Leningrad: Energiia, 1967. 895 p.
- [3] **G. Klempner, I. Kerzenbaum**, *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*, NJ: IEEE Press, 800 p.
- [4] **J. Haldemann**, Transposition in stator bars of large turbogenerators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19 (3) (2004) 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>
- [5] **M.A. Iseli, K. Reichert, G. Neidhöfer**, Calculation of current distribution and stray losses in arbitrarily transposed stator coils, *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, 2 (1988) 47–52.
- [6] **Iu.A. Bobkov**, Metod issledovaniia transpozitsii provodnikov sterzhnia obmotki statora po obobshchennym skhemam [Method of studying the transposition of the conductors of the stator winding rod using generalized schemes], *Elektrichestvo* [Electricity], 8 (1987) 55–58.
- [7] **P.A. Dergachev, M.S. Ventsev, V.V. Astafjev**, Modeling of losses in stator windings slot part of turbogenerator with transposition of strands, *Smart Electrical Engineering*, 4 (2023) 4–17. DOI: https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_4_04
- [8] **V.V. Ryzhov, O.N. Molokanov, P.A. Dergachev, S.V. Osipkin, E.P. Kurbatova, P.A. Kurbatov**, Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics, 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] **P.A. Butyrin, S.D. Dubitskii, N.V. Korovkin**, The Use of Computer Modeling in Teaching the Electromagnetic Field Theory, *Elektrichestvo* (Electricity), 10 (2014) 66–71.
- [10] **L. Zhang, Y. Liang**, A new four-row integral transposition method of stator windings and circulating current loss reduction in large turbo generators, *IET Electric Power Applications*, 17(1) (2023) 124–133. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12259>
- [11] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine based on field-circuit formulation, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 22–34, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>
- [12] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin, I.V. Ilin**, Development of method to calculate the distribution of the magnetic field, currents and losses in transposed bars of armature winding, *Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Ènergetika*, 3 (2024) 81–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002331024030054>
- [13] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine on based of straighten model, *Energetik*, 9 (2024) 3–8. DOI: <https://doi.org/10.71527/EP.EN.2024.09.001>

[14] **E.I. Iaroshenia, V.M. Pak, N.S. Oknin, Zh.P. Pogodina**, Razrabotka i issledovanie termoreaktivnoi sistemy izoliatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin [Development and research of thermosetting insulation system of high-voltage electrical machines], *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 12 (1997) 40–45.

[15] **A. Selema, M.N. Ibrahim, P. Sergeant**, Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hair-pin Winding Machines, *Machines*, 10 (5) (2022) 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050328>

[16] **A. Hebala, S. Nuzzo, P.H. Connor, G. Volpe, C. Gerada, M. Galea**, Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors, *Machines*, 10 (9) (2022) 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgeny F. KADI-OGLEY – *“Turbine technologies AAEM”*.

E-mail: e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

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

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

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

Поступила: 23.01.2025; Одобрена: 19.06.2025; Принята: 27.06.2025.

Submitted: 23.01.2025; Approved: 19.06.2025; Accepted: 27.06.2025.

Научная статья

УДК 691.175.5/.8

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31206>



*В.Е. Крафт*¹ ✉, *Б.М.Д.Н.С. Джайасингхе*¹,
*М.Э. Борисова*¹, *Г.В. Ваганов*²

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

² Филиал ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
– Институт высокомолекулярных соединений, Санкт-Петербург, Россия

✉ Sparta3006@inbox.ru

НАКОПЛЕНИЕ И РЕЛАКСАЦИЯ ЗАРЯДА В ПЛНОЧНЫХ И ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИИМИДАХ

Аннотация. Процессы накопления и релаксации объемного заряда в значительной степени определяют основные характеристики изоляционных материалов: проводимость, поляризацию, диэлектрические потери и длительную электрическую прочность, следовательно, ресурс работы изоляции. Накопление объемного заряда представляет собой нежелательное явление, поскольку оно искажает электрическое поле, ухудшает электрическую прочность и сокращает ресурс работы изоляции. С другой стороны, величина объемного заряда и его стабильность с течением времени определяют возможность работы датчиков, сенсоров и микрофонов. В данной работе представлены результаты изучения электрофизических свойств термопластичных полиимидов (ТП ПИ) Р-ОДФО, Р-СОД, полученных на основе 1,3-бис-(3,3',4,4'-дикарбоксифеноксид)бензола (диангидрид Р), 4,4'-бис-(4"-аминофеноксид)бифенила (диамин ОДФО) и бис-(4-аминофеноксид)дифенилсульфона (диамин СОД) и терморективного полиимида (ТР ПИ) ПМ-ДАДФЭ, полученного на основе пиромеллитового диангидрида (ПМ) и 4,4'-оксидифенилендиамина (ДАДФЭ). Особое внимание уделено анализу влияния структуры материала на его способность длительное время сохранять заряд (электретный эффект). Изучены свойства материалов ПМ-ДАДФЭ, изготовленных в виде пленки, полученной методом полива, и нетканого материала, полученного методом электроформования. Измерена стабильность электретной разницы потенциалов в течение длительного времени и в широком интервале температур. Методом термоактивационной спектроскопии определены характеристики релаксационных процессов. Рассматриваются механизмы накопления и релаксации заряда, влияние температуры и электрического поля в образце на стабильность объемного заряда. Результаты экспериментальных исследований анализируются на основе теоретических моделей и современных представлений о процессах релаксации заряда.

Ключевые слова: накопление заряда, релаксация заряда, термопластичные полиимиды, Р-ОДФО, Р-СОД, ПМ-ДАДФЭ, нетканый материал, релаксационные процессы, ТСД.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания (тема №12401300-0726-6 «Полимерные и композиционные материалы для перспективных технологий»).

Для цитирования:

Крафт В.Е., Джайасингхе Б.М.Д.Н.С., Борисова М.Э., Ваганов Г.В. Накопление и релаксация заряда в пленочных и волокнистых полиимидях // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 70–84. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31206>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31206>

V.E. Kraft¹ ✉, N. Jayasinghe¹, M.E. Borisova¹, G.V. Vaganov²

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

² Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute Named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute” – Institute of Macromolecular Compounds, St. Petersburg, Russia

✉ Sparta3006@inbox.ru

CHARGE ACCUMULATION AND RELAXATION IN FILM AND FIBROUS POLYIMIDES

Abstract. The processes of accumulation and relaxation of the space charge largely determine the main characteristics of insulating materials: conductivity, polarization, dielectric losses and long-term electrical strength, therefore, the service life of the insulation. The accumulation of the space charge is an undesirable phenomenon, because it distorts the electric field, worsens the electrical strength and reduces the life of the insulation. On the other hand, the value of the space charge and its stability over time determines the ability of sensors and microphones to operate. This paper presents the results of studying the electrophysical properties of thermoplastic polyimides (TP PI) R-BAPB, R-BAPS, obtained on the basis of 1,3-bis-(3,3',4,4'-dicarboxyphenoxy)benzene (R dianhydride), 4,4'-bis-(4"-aminophenoxy)biphenyl (diamine BAPB) and bis-(4-aminophenoxy)diphenylsulfone (diamine BAPS) and thermosetting polyimide PMDA-ODA (based on pyromellite dianhydride (PMDA) and 4,4'-oxidiphenylenediamine (ODA)). Particular attention was paid to the analysis of the effect of the material structure on its ability to retain charge for a long time (electret effect). The properties of PMDA-ODA materials made in the form of a film obtained by casting and a nonwoven material obtained by electroforming were studied. The stability of the electret potential difference over a long period of time and in a wide temperature range was measured. The characteristics of relaxation processes were determined by thermal activation spectroscopy methods. The mechanisms of charge accumulation and relaxation, the effect of temperature and electric field in the sample on the stability of the space charge were considered. The results of experimental studies were analyzed based on theoretical models and modern concepts of charge relaxation processes.

Keywords: charge accumulation, charge relaxation, thermoplastic polyimides, R-BAPB, R-BAPS, PMDA-ODA, nonwoven fabric, relaxation processes, TSD.

Acknowledgements: The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Polymer and composite materials for advanced technologies” (FFEF-2025-0003).

Citation:

Kraft V.E., Jayasinghe N., Borisova M.E., Vaganov G.V., Charge accumulation and relaxation in film and fibrous polyimides, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 70–84, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31206>

Введение. Полиимиды (ПИ) являются перспективными материалами для использования в высокотехнологичных областях, таких как аэрокосмическая и радиоэлектронная промышленность, и в электроизоляционной технике. Их преимущества – высокая термостойкость, механическая прочность и устойчивость к агрессивным средам [1, 2]. В зависимости от химического строения ПИ могут быть термореактивными (ТР) – например, Каптон – или термопластичными (ТП). В настоящее время ТР материалы заменяются более технологичными ТП ПИ, такими как New-ТПИ, ULTEM. К преимуществам этих ПИ можно отнести технологичность получения и возможность их вторичной переработки, что увеличивает экономическую целесообразность

их применения [3]. В данной работе использовались импортозамещающие материалы, полученные в филиале ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»» – Институте высокомолекулярных соединений.

Одним из свойств ПИ в качестве активного диэлектрика является способность накапливать и сохранять в течение длительного времени электрический заряд (электретное состояние). Данное свойство позволяет использовать ПИ в акустических преобразователях и датчиках [4], в высокочувствительных сенсорах и устройствах памяти [5]. Стабильность электретного состояния в полимерных материалах обеспечивается наличием глубоких уровней захвата для носителей зарядов (ловушек) в структуре полимера [6]. Однако в зависимости от условий эксплуатации, таких как температура, влажность и электрическое поле, время релаксации заряда может существенно уменьшаться. Для определения влияния этих факторов необходимы детальное изучение и анализ экспериментальных данных [7, 8].

Теоретическая основа исследования

Известно, что электретное состояние присуще всем диэлектрическим материалам. Изучение электретного состояния в полимерных материалах началось с исследования процессов дипольно-ориентационной поляризации и проводимости. Особый интерес представляют электреты на основе полимерных материалов. В работах А.Н. Губкина, Г. Сесслера, Е. Адамса и У.Ф. Свенна развита феноменологическая модель электретного состояния, учитывающая однородную остаточную поляризацию и изменение поверхностного гомозаряда за счет проводимости электрета.

В настоящее время особое внимание уделяется анализу экспериментальных данных на основе двух моделей: релаксации заряда за счет проводимости, неоднородной по толщине диэлектрика, и освобождения носителей заряда с ловушек и их движения со слабым и сильным перезахватом¹.

В качестве ускоренного метода изучения процессов релаксации заряда в диэлектриках широко используется метод термоактивационной спектроскопии [9].

Полимеры из ПИ материалов находят широкое применение в электротехнической и радиотехнической промышленности благодаря стойкости к высоким температурам, агрессивным средам и химическим воздействиям. Современные исследования показывают, что ТП ПИ Р-ОДФО и Р-СОД могут использоваться в условиях высоких температур и влажности [10, 11], а также являются экономически более выгодными за счет возможности вторичной переработки. Однако следует учитывать, что стабильность электретного состояния может существенно изменяться в зависимости от технологической структуры материала и условий его эксплуатации [12].

В настоящее время проявляется повышенный интерес к ТР ПИ ПМ-ДАДФЭ, изготовленным в виде нетканого полотна методом электроформования (ЭФ). За счет пористой структуры нетканые материалы широко используются в качестве электрически заряженных фильтров [13]. Нетканые полотна имеют чрезвычайно широкий спектр применений: биомедицина, тканевая инженерия и доставка лекарств [14]; датчики и сенсоры, межэлектродные сепараторы в литий-ионных аккумуляторах [15]; диэлектрический слой в интегральных схемах.

Методика исследования

Исследования проводились на пленках ТП ПИ (Р-ОДФО и Р-СОД), а также на пленках и нетканых материалах из ТР ПИ (ПМ-ДАДФЭ). Пленки получались методом полива на стекле 20%-ного раствора полиамидкислоты (ПАК) с последующей сушкой и термической циклизацией при температурах 100°C, 200°C и 300°C в случае ТП ПИ [16]. При изготовлении ТР ПИ температура увеличивается до 350°C. Толщина материалов варьировалась от 20 до 50 мкм.

¹ Борисова М.Э., Койков С.Н. Физика диэлектриков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. С. 218–220.

Нетканый ПИ материал был получен методом ЭФ из водных растворов триэтиламмонийной соли полиаминокислоты (СПАК) на основе пиромеллитового диангида (ПМ) и 4,4'-диаминдифенилового эфира (ДАДФЭ) [17]. Нетканые ПИ изготавливались с помощью установки Nanon-01A (Месс Со., Япония). Рабочее напряжение в камере составляло 20–30 кВ. Микрофотография нетканого ПИ и распределение диаметров волокон представлены на рис. 1. Толщина полученных образцов составляла 20 мкм.

Зарядка проводилась в плазме коронного разряда при отрицательной полярности иглы. Поверхность, обращенная в сторону газового разряда, накапливала отрицательный гомозаряд. Зарядка электретов осуществлялась при помощи трехэлектродной системы – коронирующего электрода (иглы), заземленного электрода и сетки, которая располагается между ними. Сетка обеспечивала зарядку до необходимой величины потенциала и равномерное распределение заряда по площади образца.

Параметры электрета измерялись методом электростатической индукции. Использовался метод компенсации с вибрирующим электродом.

Величины U_3 (электретная разность потенциалов) и q (суммарный заряд на единицу площади) являются основными характеристиками электрета²:

$$U_3 = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon} \left[\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} h + \int_0^h \left(x - \frac{h}{2} \right) \rho dx + \int_0^h P_s(x) dx \right] = \frac{M_3}{\varepsilon \varepsilon_0}; \quad (1)$$

$$q = \sigma_1 + \sigma_2 + \int_0^h \rho dx, \quad (2)$$

где σ_i и ρ – поверхностная и объемная плотность заряда соответственно, P_s – остаточная поляризация, ε – диэлектрическая проницаемость материала (электрета), ε_0 – диэлектрическая постоянная, h – толщина электрета, M_3 – электрический момент электрета относительно центральной плоскости $\frac{h}{2}$.

Величина U_3 определяется следующим соотношением:

$$U_3 = \frac{U_h - U_0}{2} = \frac{M_3}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (3)$$

где U_h и U_0 – компенсирующие разности потенциалов, измеренные при различном положении образца в ячейке.

В простейшем случае связь между U_3 и эффективной плотностью заряда $\sigma_{\text{эфф}}$ определяется простыми выражениями:

$$U_3 = \frac{\sigma_{\text{эфф}} h}{\varepsilon \varepsilon_0}; \quad \sigma_{\text{эфф}} = \frac{U_3 \varepsilon \varepsilon_0}{h}. \quad (4)$$

При этом точность измерения U_3 составляла 10 В.

Для измерения токов ТСД применялись высокочувствительные измерительные приборы (например, вольтметр-электромметр В7-30). Разрешающая способность электромметра составляет $(10^{-15} - 10^{-7})$, а погрешность – 5%. Температура образцов измерялась с помощью термопары

² Борисова М.Э., Галюков О.В., Цацынкин П.В. Физика диэлектрических материалов. Электроперенос и накопление заряда в диэлектриках. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 70.

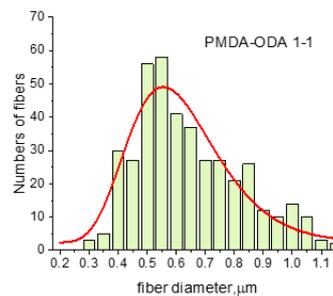
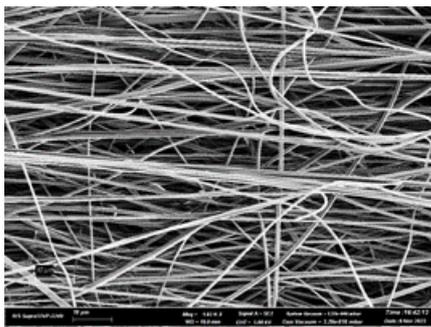


Рис. 1. Микрофотография нетканого ПИ и логнормальное распределение диаметров волокон [18]

Fig. 1. Micrography of nonwoven PI and the lognormal distribution of fiber diameters [18]

хромель-копель с точностью до 2°C. Зависимость тока от температуры регистрировалась с помощью компьютера. Измерения токов ТСД проводились в разомкнутой цепи, что обеспечивалось использованием изолирующих прокладок из пленок ПТФЭ, помещенных между электродом и поверхностью электрета.

Результаты и обсуждение

Температурная зависимость стабильности электретного состояния

Для оценки стабильности электретного состояния широко используются методы термоактивационной спектроскопии: термостимулированной деполяризации (ТСД), термостимулированной поляризации (ТСП) и термостимулированного напряжения (ТСН) [19]. В настоящей работе использовался метод токов ТСД. Из спектров токов ТСД определяются суммарный заряд, накопленный в диэлектрике, механизмы накопления и релаксации этого заряда, а также его стабильность в широком интервале температур и времени.

При оценке релаксации заряда используются два механизма: за счет процессов собственной проводимости диэлектрика либо за счет освобождения заряда с ловушек и дрейфа носителей в условиях слабого, среднего и сильного перезахвата. Характерной величиной релаксационного процесса является энергия активации. Расчет энергии активации проводился на основе модели двухкомпонентного трехслойного диэлектрика с разными значениями γ_i , ϵ_i , и h_i . Величина энергии активации определялась из максимумов спектров токов ТСД методом подгонки.

Спектры токов ТСД пленочных ТП ПИ (Р-СОД, Р-ОДФО) представлены на рис. 2. Измерения проводились в открытой цепи, т.е. при наличии изолирующей прокладки из ПТФЭ толщиной $h = 21$ мкм ($\rho_{\text{ПТФЭ}} \gg \rho_{\text{ПИ}}$), при нагреве образца с постоянной скоростью $\beta = 2^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Основная часть заряда релаксирует в области высокотемпературного максимума (T_{max}), соответствующего на рис. 2 положительному направлению тока³. Положительное направление тока в случае измерения в открытой цепи (при наличии изолирующей прокладки) соответствует движению носителей заряда через объем образца. Видно, что максимум тока ТСД пленки Р-ОДФО расположен в области более высокой температуры по сравнению с максимумом пленки Р-СОД: 431 К и 424 К соответственно.

Спектры токов ТСД для ТР ПИ ПМ-ДАДФЭ в пленочном и нетканом виде также представлены на рис. 2. Релаксация зарядов пленочного и нетканого ПМ-ДАДФЭ происходит в одной температурной области 440 ± 2 К. При этом амплитудное значение тока в области низкотемпературного максимума (375–385 К) на порядок ниже, чем у высокотемпературного.

Из сравнения спектров токов видно, что максимум тока в материалах из ТР ПИ находится при температуре на 20 К выше, чем у ТП ПИ, что говорит о более высокой термостабильности ТР ПИ.

³ Борисова, М.Э. Физика диэлектриков. Физические основы активных диэлектриков: учебное пособие. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 99.

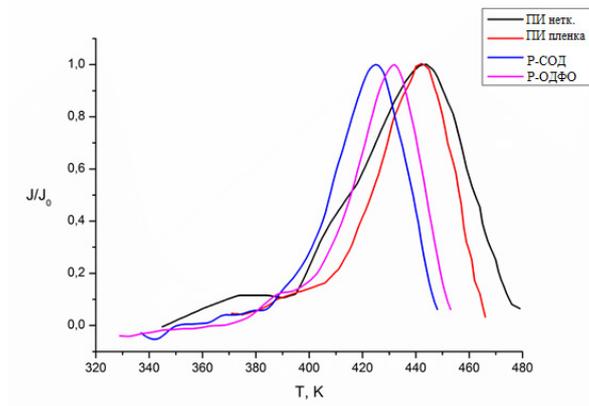


Рис. 2. Зависимости токов ТСД пленок ПМ-ДАДФЭ, Р-СОД, Р-ОДФО и нетканого материала ПМ-ДАДФЭ при линейном нагреве образцов

Fig. 2. Dependences of the TSD currents of PMDA-ODA, R-BAPS, R-BAPB films and nonwoven PMDA-ODA material during linear heating of samples

В простейшем случае анализ максимумов токов ТСД может быть выполнен с учетом предположений:

$$U_3(t) = U_{30} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right); \quad (5)$$

$$\tau = \tau_0 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (6)$$

где $\tau_0 = \frac{1}{\omega_0}$, ω_0 – частотный фактор.

При анализе релаксационных процессов широко используется «метод подгонки». В этом случае экспериментальная кривая сопоставляется с рассчитанной на основе выбранной модели. В данной работе в качестве исходных соотношений были выбраны зависимости (5), (6). Формула для максимума тока ТСД выводится исходя из выбранного модельного представления о релаксации заряда. Для усовершенствования методики подгонки целесообразно преобразовать выражение (7):

$$j_{TSD} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 U_{30}}{\tau_0 h} \exp\left[-\frac{W}{kT} - \frac{1}{\beta\tau_0} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{W}{kT'}\right) dT'\right]. \quad (7)$$

Определение частотного фактора $\omega = 1/\tau_0$ методом экстраполяции недостаточно обосновано, так как механизм релаксации заряда может изменяться с увеличением температуры. Вследствие этого величины τ_0 или ω можно исключить из (7), используя τ_m – время релаксации при температуре максимума, которое при необходимости легко рассчитать из кривой тока ТСД:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W}{kT}\right) \\ \tau_m = \tau_0 \exp\left(\frac{W}{kT_m}\right) \end{cases}, \text{ следовательно } \tau = \tau_m \exp\left(\frac{W}{kT} - \frac{W}{kT_m}\right). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (7), т.е. заменяя τ_0 на τ , и учитывая, что $T = \beta t$, получаем выражение для плотности тока:

$$j_{\text{тсд}} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0 U_{\varepsilon_0}}{h\tau_m} \exp\left[\frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T}\right)\right] \exp\left\{-\frac{1}{\beta\tau_m} \int_{T_0}^T \exp\left[\frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T'}\right)\right] dT'\right\}, \quad (9)$$

где T_0 – температура начала максимума.

Определив τ_m из экспериментальной кривой и варьируя значение W , по формуле (9) можно рассчитать теоретическую зависимость тока ТСД. Методику расчета можно усовершенствовать, преобразуя выражение (9). Воспользовавшись условием экстремума $dj_{\text{ТСД}}/dT = 0$, получим для τ_m при $T = T_m$:

$$\frac{\beta\tau_m W}{kT_m^2} = 1, \text{ т.е. } \tau_m = kT_m^2/\beta W \text{ и } \frac{W\beta \exp\left(\frac{W}{kT_m}\right)}{kT_m^2\omega} = 1. \quad (10)$$

Подставив (10) в (9), найдем выражение для $j_{\text{ТСД}}$:

$$j_{\text{ТСД}} = \frac{d\sigma_{\text{инд}}}{dt} = j_m \exp\left[\frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T}\right)\right] \exp\left\{-\frac{W}{kT_m^2} \int_{T_m}^T \exp\left[\frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T'}\right)\right] dT'\right\}, \quad (11)$$

где j_m – плотность тока в максимуме.

При неплотном контакте с электродом, т.е. при наличии изолирующих прокладок ($\rho_{\text{ПТФЭ}} \gg \gg \rho_{\text{ПИ}}$) между образцом и электродом, необходимо учитывать параметры прокладки, влияющие на величину индуцированного заряда:

$$\sigma_{\text{инд}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\varepsilon_{\text{пр}}U_{\varepsilon_0}}{\varepsilon h_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{пр}}h}, \quad (12)$$

тогда выражение для j_m :

$$j_m = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\varepsilon_{\text{пр}}U_{\varepsilon_0}}{\tau_m(\varepsilon h_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{пр}}h)} \exp\left\{-\frac{W}{kT_m^2} \int_{T_0}^{T_m} \exp\left[\frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T}\right)\right] dT\right\}, \quad (13)$$

или с учетом (10) получим:

$$j_m = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\varepsilon_{\text{пр}}U_{\varepsilon_0}\beta W}{(\varepsilon h_{\text{пр}} + \varepsilon_{\text{пр}}h)kT_m^2} \exp\left\{-\frac{W}{kT_m^2} \int_{T_0}^{T_m} \exp\left[\frac{W}{k}\left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T}\right)\right] dT\right\}. \quad (14)$$

Данный расчет проведен для высокотемпературного максимума. Формула (11) содержит только три параметра – j_m , T_m , W . Варьируя величину W , возможно подогнать рассчитанный максимум к экспериментально полученному (как показано на рис. 3), если максимум соответствует релаксации 1-го порядка. Таким путем в результате подгонки определяем значение энергии активации W релаксации заряда. Заметим, что в формулу (11) не входят ни скорость

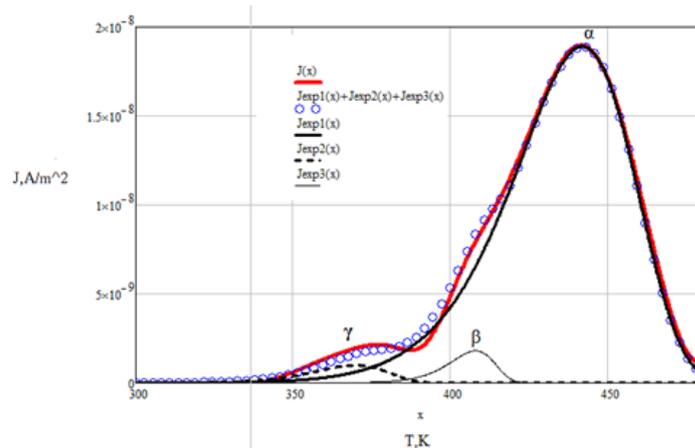


Рис. 3. Плотность тока ТСД для нетканого ПИ
Fig. 3. TSD current density for nonwoven PI

нагрева β , ни трудно определяемый частотный фактор $\omega_0 = \frac{1}{\tau_0}$. Основные параметры кривых ТСД приведены в табл. 1.

На рис. 3 представлена кривая тока ТСД, полученная методом подгонки (\circ). Она совпадает с кривой, полученной в результате эксперимента, что говорит о правильности произведенных расчетов. Спектр тока ТСД нетканого ПИ материала содержит три максимума: низкотемпературный максимум с $T_\gamma = 369$ К, среднетемпературный с $T_\beta = 408$ К и высокотемпературный с $T_\alpha = 442$ К. Важно отметить, что релаксация основной части заряда происходит в высокотемпературной области.

Таблица 1

Основные параметры кривых токов ТСД ПИ образцов

Table 1

Main parameters of the TSD current curves of polyimide samples

Расчетные максимумы	$j_m \cdot 10^{-8}$, А/м ²	T_m , К (°С)	$W_{\text{акт}}$, эВ	ω_0 , с ⁻¹
j Р-СОД	9,59	424(151)	1,2	$2,99 \cdot 10^{11}$
j Р-ОДФО	14,74	431(158)	1,3	$3,76 \cdot 10^{12}$
j ПМ	5,66	438(165)	1,2	$1,93 \cdot 10^{11}$
j нетканый ПИ	1,89	442(169)	0,9	$5,55 \cdot 10^6$

Как видно из табл. 1, температура высокотемпературного максимума ТР ПИ выше, чем у ТП ПИ. Данные результаты следует иметь в виду при использовании ПИ материалов в электретных устройствах, работающих при повышенных температурах окружающей среды.

Следует отметить, что спектр тока ТСД в значительной степени зависит от механического воздействия (степени давления или растяжения) на образец в процессе его нагрева. Поэтому модель Дебая, использованная при определении $W_{\text{акт}}$ из спектров ТСД в случае нетканого материала, не всегда применима. Степень ее использования зависит от истории образца и силы давления на него со стороны электродов. Механическое воздействие на нетканый образец может приводить к заниженному значению энергии активации.

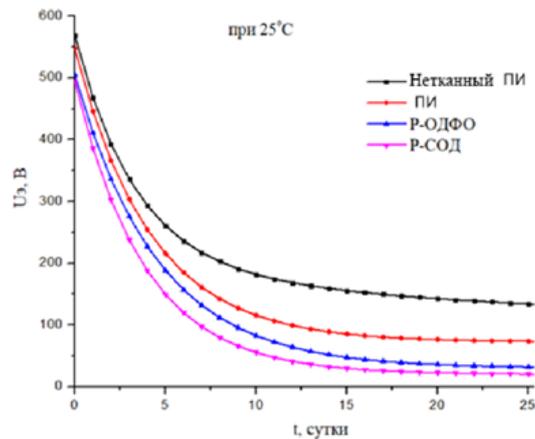


Рис. 4. Зависимости U_e от времени для образцов нетканого ПИ, пленочного ПИ, P-ОДФО и P-СОД при 25°C
 Fig. 4. Time dependence of U_e for samples of nonwoven PI, film PI, R-BAPS, R-BAPB at 25°C

Природа ловушек, локализованных на границах раздела слоев, в нетканом материале, состоящем из волокон и воздушных включений, может существенно отличаться от ловушек в полимерных пленках ПИ.

Механизмы релаксации заряда

Механизмы накопления и релаксации заряда в полимерных пленках зависят от их внутренней структуры и типа поляризации. В полимерных пленках, заряженных в коронном разряде, основными механизмами релаксации являются собственная проводимость диэлектрика или освобождение инжектированных носителей с ловушек [20]. Объемный заряд может искажать электрическое поле и снижать изоляционные свойства пленки [21].

Релаксация заряда с течением времени при нормальных условиях хранения образцов в различных ПИ материалах представлена на рис. 4. Из рис. 4 видно, что стабильность электретоного состояния в изотермических условиях при комнатной температуре у нетканого ПИ-ДАДФЭ существенно выше, чем у пленочных ПИ. Так, U нетканого образца уменьшается с 550 В до 200 В примерно за десять суток. Электретоная разность потенциала пленочных образцов уменьшается до 200 В уже на пятые сутки, что серьезно ограничивает сферы их применения.

Релаксация заряда с течением времени при повышенной температуре (100°C) в различных ПИ материалах представлена на рис. 5. С ростом температуры происходит повышение подвижности и концентрации заряженных частиц, что приводит к увеличению собственной проводимости материала, при этом ускоряется процесс релаксации накопленного заряда. Таким образом, при повышенных температурах к материалам предъявляются особые требования. Из представленного графика можно сделать вывод о преимуществе нетканой формы ПИ.

С повышением температуры окружающей среды время релаксации заряда уменьшается у всех исследованных материалов (рис. 5). Причем по истечении пяти суток электретоное состояние сохраняется только в нетканых ПИ-ДАДФЭ.

При условии, что релаксация заряда осуществляется за счет собственной проводимости материала, величина γ была рассчитана на основе измеренных данных с помощью выражения:

$$\gamma = -\epsilon\epsilon_0 \frac{dU}{Udt}. \quad (15)$$

Рассчитанная зависимость $\gamma = f(t)$ по формуле (15) представлена на рис. 6 и 7. Спадание проводимости с течением времени является характерной особенностью для полимерных

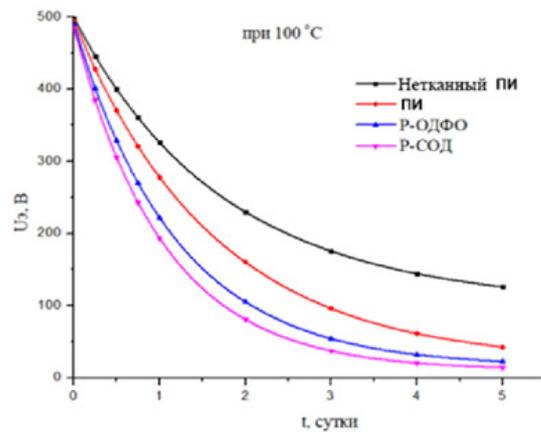


Рис. 5. Зависимости U_c от времени для образцов нетканого ПИ, пленочного ПИ, Р-ОДФО и Р-СОД при 100°C
Fig. 5. Time dependence U_c for samples of nonwoven PI, film PI, R-BAPS, R-BAPB at 100°C

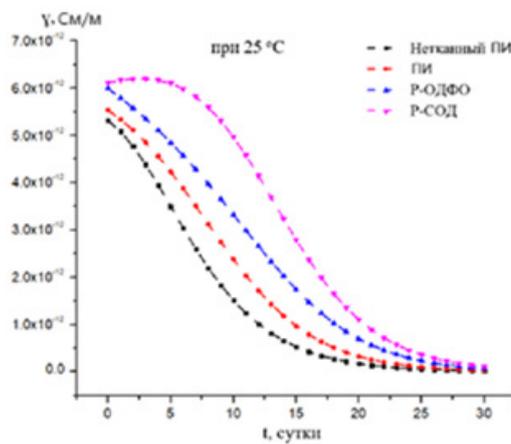


Рис. 6. Расчетные зависимости проводимости от времени пленок Р-СОД, Р-ОДФО, ПИ и нетканого ПИ при 25°C
Fig. 6. Calculated dependences of conductivity on time of films of R-BAPS, R-BAPB, PI and nonwoven PI at 25°C

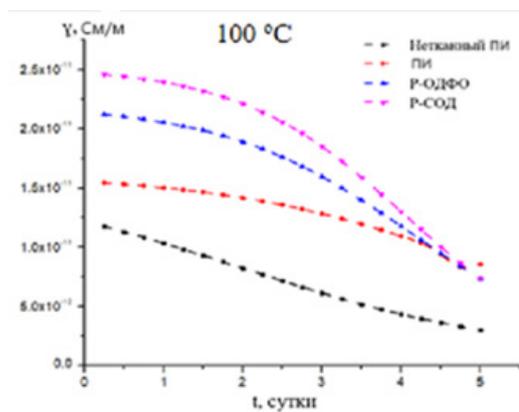


Рис. 7. Расчетные зависимости проводимости от времени пленок Р-СОД, Р-ОДФО, ПИ и нетканого ПИ при 100°C
Fig. 7. Calculated dependences of conductivity on time of films of R-BAPS, R-BAPB, PI and nonwoven PI at 100°C

диэлектриков. Как видно, при температуре 25°C и 100°C соответственно самая высокая проводимость наблюдается у пленок Р-СОД, а самая низкая – у нетканого материала ПИ. Экспериментальные данные, полученные с применением различных методов, однозначно подтверждают, что релаксация заряда, накопленного в полимерных диэлектриках, обусловлена их собственной проводимостью.

Заключение

Изучена стабильность накопленного в диэлектрике заряда в изотермическом и термостимулированном режимах. Проведен термоактивационный анализ. На основе модели двухслойного диэлектрика из кривых $U_s(t)$ рассчитаны зависимости проводимости от времени.

Практическая значимость результатов данной работы заключается в определении возможности использования ТП ПИ Р-ОДФО и Р-СОД, а также ТР ПИ ПМ-ДАДФЭ в пленочной и нетканой формах в различных областях промышленности (в электроизоляционной технике, в кабельной и конденсаторной промышленности). Электреты, изготовленные из данных материалов, могут найти применение в высокочувствительных сенсорах [1], биомедицине и тканевой инженерии.

В результате установлено следующее:

1. ТП материалы более технологичны, чем ТР ПИ, и могут изготавливаться в любых заданных формах. Однако пленочные ТР ПИ имеют более высокую термостойкость и стабильность электретной разности потенциала (рис. 4, 5).

2. Заряд, накопленный в нетканых ПИ, сохраняется в течение более длительного времени как при нормальных условиях, так и при повышенных температурах. Так, в течение 25 суток нетканый ПМ-ДАДФЭ сохраняет свой заряд (до 200 В) (рис. 4), тогда как пленочные материалы теряют свои электретные свойства.

3. Релаксация заряда ускоряется при механическом воздействии на материал (сжатие или растяжение) [22]. Данный эффект существенно проявляется в нетканых материалах, так как они обладают пониженной механической прочностью по сравнению с пленками. Значения напряжения на разрыв вдоль волокон нетканого полотна ПМ-ДАДФЭ лежат в диапазоне $33,8 \pm 3,0$ МПа. Тогда как напряжение на разрыв пленки ПМ-ДАДФЭ составляет $135,1 \pm 6,2$ МПа, что существенно выше, чем у нетканого материала.

4. Пониженное значение $W_{\text{акт}}$ в нетканых образцах может быть обусловлено воздействием двух механизмов релаксации заряда: за счет проводимости материала и за счет освобождения носителей заряда с ловушек [13]. Механическое давление на электретный материал способствует освобождению носителей заряда с ловушек и снижению $W_{\text{акт}}$.

Исходя из полученных данных, можно рекомендовать электреты из нетканого ПИ для производства кабельных датчиков, использующихся при геологической разведке земных недр на материковом шельфе. Перспективным является применение нетканого ПИ материала в качестве датчиков и фильтров, работающих в средах с повышенной температурой.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение влияния различных типов химической модификации и добавок на электретные свойства полимеров [23]. Кроме того, перспективным направлением является повышение стабильности электретного состояния полимеров путем оптимизации их структуры и состава. В частности, использование наночастиц и других модификаторов может значительно улучшить электрические и механические свойства полимеров [24].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Raju G.G., Shaikh R., Haq S.U.** Electrical conduction processes in polyimide films, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15 (3) (2008) 663–670. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4543102
- [2] **Barra G., Guadagno L., Raimondo M., Santonicola M.G., Toto E., Cipriotti S.V.** A comprehensive review on the thermal stability assessment of polymers and composites for aeronautics and space applications, *Polymers*, 15 (18) (2023) 3786. DOI: 10.3390/polym15183786
- [3] **Feng X., Liu J.** Thermoplastic Polyimide (TPI). In: *High Performance Polymers and Their Nanocomposites* (eds. P.M. Visakh, A.O. Semkin), (2018) 149–219. DOI: 10.1002/9781119363910.ch6
- [4] **Saxena P., Shukla P.** A review of polymer electrets and their applications, *Materials Performance and Characterization*, 9 (1) (2020) 701–710. DOI: 10.1520/MPC20200126
- [5] **Eng Y.J., Weng Y.-H., Oh A.B., Liu C.-L., Chan J.M.W.** Polymer electrets for organic nonvolatile memory devices: Recent advances, *Materials Today Chemistry*, 42 (2024) 102380. DOI: 10.1016/j.mtchem.2024.102380
- [6] **Pakhotin V.A., Semenov S.E.** Charge stabilization in corona electrets made of HDPE film due to the formation of deep electron traps during its orientational stretching, *Journal of Applied Physics*, 136 (12) (2024) 124101. DOI: 10.1063/5.0215295
- [7] **Liu C., Dai Z., He B., Ke Q.-F.** The effect of temperature and humidity on the filtration performance of electret melt-blown nonwovens, *Materials*, 13 (21) (2020) 4774. DOI: 10.3390/ma13214774
- [8] **Borisova M., Kamalov A., Jayasinghe N., Chirioteva A.** Charge relaxation and kinetic accumulation of non-woven polypropylene and polyimide films, *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, (2022) 1332–1334. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755471
- [9] **Гороховатский Ю.А.** Термоактивационная спектроскопия (феноменологическая теория, экспериментальная методика, примеры применения), СПб: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2023. 160 с.
- [10] **Kamalov A., Borisova M., Didenko A., Vaganov G., Yudin V.** Influence of manufacturing techniques R-BAPB polyimide films on charge relaxation, *AIP Conference Proceedings*, 2308 (1) (2020) 030012. DOI: 10.1063/5.0033343
- [11] **Yudin V.E., Feldman A.Y., Svetlichnyi V.M., Shumakov A.N., Marom G.** Crystallization of R-BAPB type polyimide modified by carbon nano-particles, *Composites Science and Technology*, 67 (5) (2007) 789–794. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.01.038
- [12] **Kraft V., Borisova M., Jayasinghe B.M.D.N.S., Vaganov G.** Electrical and electret properties of polypropylene and polyimide nonwovens, *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon)*, (2024) 606–608. DOI: 10.1109/EICon61730.2024.10468224
- [13] **Дружинин Э.А., Садовский Б.Ф., Петрянов И.В.** Многокомпонентные нетканые материалы ФП из супертонких волокон для сверхчистых технологий // Сборник международного симпозиума «Фильтровальные нетканые материалы». 1993. С. 105–116.
- [14] **Матреничев В.В., Попрядухин П.В., Склизкова В.П., Светличный В.М., Крюков А.Е., Смирнова Н.В., Иванькова Е.М., Попова Е.Н., Добровольская И.П., Юдин В.Е.** Получение нановолокон из ароматического полиимиды и материалов на их основе для клеточных технологий // *Высокомолекулярные соединения (серия А)*. 2018. Т. 60, № 4. С. 296–303. DOI: 10.7868/S2308112018040041
- [15] **Costa C.M., Lee Y.-H., Kim J.-H., Lee S.-Y., Lanceros-Méndez S.** Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes, *Energy Storage Materials*, 22 (2019) 346–375. DOI: 10.1016/j.ensm.2019.07.024
- [16] **Kamalov A., Didenko A., Ivanov A. et al.** Effect of the rigidity of polyimide matrices on the electrical conductivity of graphene-containing composites, *Journal of Polymer Research*, 32 (2025) 2. DOI: 10.1007/s10965-024-04232-9
- [17] **Светличный В.М., Ваганов Г.В., Мягкова Л.А. и др.** Электроформование водных растворов триэтиламмонийной соли полиаминокислоты и свойства полиимидного нетканого материала // *Журнал прикладной химии*. 2020. Т. 93, № 1. С. 43–53. DOI: 10.31857/S0044461820010041

[18] Kamalov A., Vaganov G., Simonova M., Kraft V., Nesterova A., Saprykina N., Romasheva M., Filippov A., Yudin V. Effect of the molar mass of polyimide based on pyromellitic dianhydride and 4,4'-oxydianiline on dielectric and mechanical properties of nonwoven oriented polyimide materials, *Polymer Engineering and Science*, 64 (6) (2024) 2894–2904. DOI: 10.1002/pen.26733

[19] Цыдыпов Ш.Б., Герман Е.И., Жданов И.А., Семенова В.Э. Термостимулированные токи в неравновесных мелкодисперсных системах под действием внутренних полей // *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика*. 2021. № 1. С. 43–51. DOI: 10.18101/2306-2363-2021-1-43-51

[20] Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A., Sudar' N.T. Dielectric aging and dielectric degradation (breakdown) of polymer films in AC electric fields, *Physics of Solid State*, 61 (2019) 1915–1921. DOI: 10.1134/S1063783419100408

[21] Долженко Д.И., Захарова И.Б., Сударь Н.Т. Инжекционные токи в поликристаллических пленках С60 // *Наука настоящего и будущего*. 2019. Т. 3. С. 59–62.

[22] Борисова М.Э., Закревский В.А., Койков С.Н., Тихомиров А.Ф. Влияние деформаций на величину заряда пленочных полимерных электретов // *Высокомолекулярные соединения*. 1983. Т. 25, № 8. С. 571–574.

[23] Erhard D.P., Richter F., Bartz C.B.A., Schmidt H.-W. Fluorinated aromatic polyimides as high-performance electret materials. *Macromolecular Rapid Communications*, 36 (6) (2015) 520–527. DOI: 10.1002/marc.201400638

[24] Смирнова В.Е., Сапрыкина Н.Н., Лаврентьев В.К., Попова Е.Н., Колбе К.А., Кузнецов Д.А., Юдин В.Е. Механические свойства и надмолекулярная структура ориентированных полиимидных пленок, наполненных углеродными нановолокнами // *Высокомолекулярные соединения (серия А)*. 2021. Т. 63, № 3. С. 210–220. DOI: 10.31857/S2308112021030123

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРАФТ Вадим Евгеньевич – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: Sparta3006@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6339-5494>

ДЖАЙАСИНГХЕ Б.М.Д.Н.С. – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: nilansankalpa@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9889-0616>

БОРИСОВА Маргарита Эдуардовна – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: vladimirl.borisov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0761-6302>

ВАГАНОВ Глеб Вячеславович – старший научный сотрудник, Филиал ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институт высокомолекулярных соединений, канд. техн. наук.

E-mail: glebvaganov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0210-7456>

REFERENCES

- [1] **G.G. Raju, R. Shaikh, S.U. Haq**, Electrical conduction processes in polyimide films, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15 (3) (2008) 663–670. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4543102
- [2] **G. Barra, L. Guadagno, M. Raimondo, M.G. Santonicola, E. Toto, S.V. Cipriotti**, A comprehensive review on the thermal stability assessment of polymers and composites for aeronautics and space applications, *Polymers*, 15 (18) (2023) 3786. DOI: 10.3390/polym15183786
- [3] **X. Feng, J. Liu**, Thermoplastic Polyimide (TPI). In: *High Performance Polymers and Their Nanocomposites* (eds. P.M. Visakh, A.O. Semkin), (2018) 149–219. DOI: 10.1002/9781119363910.ch6
- [4] **P. Saxena, P. Shukla**, A review of polymer electrets and their applications, *Materials Performance and Characterization*, 9 (1) (2020) 701–710. DOI: 10.1520/MPC20200126
- [5] **Y.J. Eng, Y.-H. Weng, A.B. Oh, C.-L. Liu, J.M.W. Chan**, Polymer electrets for organic nonvolatile memory devices: Recent advances, *Materials Today Chemistry*, 42 (2024) 102380. DOI: 10.1016/j.mtchem.2024.102380
- [6] **V.A. Pakhotin, S.E. Semenov**, Charge stabilization in corona electrets made of HDPE film due to the formation of deep electron traps during its orientational stretching, *Journal of Applied Physics*, 136 (12) (2024) 124101. DOI: 10.1063/5.0215295
- [7] **C. Liu, Z. Dai, B. He, Q.-F. Ke**, The effect of temperature and humidity on the filtration performance of electret melt-blown nonwovens, *Materials*, 13 (21) (2020) 4774. DOI: 10.3390/ma13214774
- [8] **M. Borisova, A. Kamalov, N. Jayasinghe, A. Chiriateva**, Charge relaxation and kinetic accumulation of non-woven polypropylene and polyimide films, *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, (2022) 1332–1334. DOI: 10.1109/ElConRus54750.2022.9755471
- [9] **Iu.A. Gorokhovatskii**, Termoaktivatsionnaia spektroskopii (fenomenologicheskaiia teoriia, eksperimental'naia metodika, primery primeneniia) [Thermal activation spectroscopy (phenomenological theory, experimental technique, application examples)], St. Petersburg: Izd-vo RGPU im. A.I. Gertsena, 2023. 160 p.
- [10] **A. Kamalov, M. Borisova, A. Didenko, G. Vaganov, V. Yudin**, Influence of manufacturing techniques R-BAPB polyimide films on charge relaxation, *AIP Conference Proceedings*, 2308 (1) (2020) 030012. DOI: 10.1063/5.0033343
- [11] **V.E. Yudin, A.Y. Feldman, V.M. Svetlichnyi, A.N. Shumakov, G. Marom**, Crystallization of R-BAPB type polyimide modified by carbon nano-particles, *Composites Science and Technology*, 67 (5) (2007) 789–794. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.01.038
- [12] **V. Kraft, M. Borisova, B.M.D.N.S. Jayasinghe, G. Vaganov**, Electrical and electret properties of polypropylene and polyimide nonwovens, *2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon)*, (2024) 606–608. DOI: 10.1109/ElCon61730.2024.10468224
- [13] **E.A. Druzhinin, B.F. Sadovskii, I.V. Petrianov**, Mnogokomponentnye netkanye materialy FP iz super-tonkikh volokon dlia sverkhchistyykh tekhnologii [Multicomponent nonwoven materials FP from superfine fibers for ultra-clean technologies], *Sbornik mezhdunarodnogo simpoziuma "Fil'troval'nye netkanye materialy"* [Proceedings of the International Symposium "Filtration Nonwoven Materials"], (1993) 105–116.
- [14] **V.V. Matrenichev, P.V. Popryadukhin, V.P. Sklizkova, V.M. Svetlichnyi, A.E. Kryukov, N.V. Smirnova, E.M. Ivan'kova, E.N. Popova, I.P. Dobrovol'skaya, V.E. Yudin**, Obtainment of aromatic polyimide nanofibers and materials on their basis for cell technologies, *Polymer Science, Series A*, 60 (4) (2018) 483–490. DOI: 10.1134/S0965545X18040053
- [15] **C.M. Costa, Y.-H. Lee, J.-H. Kim, S.-Y. Lee, S. Lanceros-Méndez**, Recent advances on separator membranes for lithium-ion battery applications: From porous membranes to solid electrolytes, *Energy Storage Materials*, 22 (2019) 346–375. DOI: 10.1016/j.ensm.2019.07.024
- [16] **A. Kamalov, A. Didenko, A. Ivanov et al.**, Effect of the rigidity of polyimide matrices on the electrical conductivity of graphene-containing composites, *Journal of Polymer Research*, 32 (2025) 2. DOI: 10.1007/s10965-024-04232-9

- [17] V.M. Svetlichnyi, G.V. Vaganov, L.A. Myagkova et al., Electrospinning of Aqueous Solutions of a Triethylammonium Salt of Polyamic Acid and Properties of the Nonwoven Polyimide Materials, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 93 (1) (2020) 35–44. DOI: 10.1134/S1070427220010048
- [18] A. Kamalov, G. Vaganov, M. Simonova, V. Kraft, A. Nesterova, N. Saprykina, M. Romasheva, A. Filipov, V. Yudin, Effect of the molar mass of polyimide based on pyromellitic dianhydride and 4,4'-oxydianiline on dielectric and mechanical properties of nonwoven oriented polyimide materials, *Polymer Engineering and Science*, 64 (6) (2024) 2894–2904. DOI: 10.1002/pen.26733
- [19] Sh.B. Tsydyпов, E.I. German, I.A. Zhdanov, V.E. Semenova, Thermostimulated Currents in Non-Equilibrium Chalk-Codisperse Systems Under the Action of Internal Fields, *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics*, 1 (2021) 43–51. DOI: 10.18101/2306-2363-2021-1-43-51
- [20] V.A. Zakrevskii, V.A. Pakhotin, N.T. Sudar', Dielectric aging and dielectric degradation (break-down) of polymer films in AC electric fields, *Physics of Solid State*, 61 (2019) 1915–1921. DOI: 10.1134/S1063783419100408
- [21] D.I. Dolzhenko, I.B. Zakharova, N.T. Sudar', Inzheksionnye toki v polikristallicheskikh plenkakh C60 [Injection currents in polycrystalline C60 films], *Nauka nastoiashchego i budushchego [Science of the present and the future]*, 3 (2019) 59–62.
- [22] M.E. Borisova, V.A. Zakrevskii, S.N. Koikov, A.F. Tikhomirov, Vliianie deformatsii na velichinu zariada plenochnykh polimernykh elektretov [The influence of deformations on the charge value of film polymer electrets], *Polymer Science, Series A*, 25 (8) (1983) 571–574.
- [23] D.P. Erhard, F. Richter, C.B.A. Bartz, H.-W. Schmidt, Fluorinated aromatic polyimides as high-performance electret materials. *Macromolecular Rapid Communications*, 36 (6) (2015) 520–527. DOI: 10.1002/marc.201400638
- [24] V.E. Smirnova, N.N. Saprykina, V.K. Lavrent'ev, E.N. Popova, K.A. Kolbe, D.A. Kuznetsov, V.E. Yudin, Mechanical properties and supramolecular structure of oriented polyimide films filled with carbon nanofibers, *Polymer Science, Series A*, 63 (3) (2021) 307–317. DOI: 10.1134/S0965545X21030123

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vadim E. KRAFT – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: Sparta3006@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6339-5494>

Nilan JAYASINGHE – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nilansankalpa@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9889-0616>

Margarita E. BORISOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: vladimirl.borisov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0761-6302>

Gleb V. VAGANOV – *Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute Named by B.P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute” – Institute of Macromolecular Compounds.*

E-mail: glebvaganov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0210-7456>

Поступила: 17.02.2025; Одобрена: 12.03.2025; Принята: 21.03.2025.

Submitted: 17.02.2025; Approved: 12.03.2025; Accepted: 21.03.2025.

Научная статья

УДК 621.313.322

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31207>



*Е.Ф. Кади-Оглы*¹ ✉, *Н.В. Коровкин*²

¹ «Турбинные технологии ААЭМ», Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

РЕЗУЛЬТАТЫ ВАРИАНТНОГО РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ТОКОВ, ПОТЕРЬ И ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ В СТЕРЖНЕВОЙ ОБМОТКЕ ЯКОРЯ С КОСВЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ЦЕПНО-ПОЛЕВОЙ ПОСТАНОВКИ

Аннотация. В данной статье представлены результаты вариантного расчета потерь и индуктивных сопротивлений рассеяния в пазовых частях стержневых обмоток якоря электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением, выполненного на основе решения задачи магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоской постановке с учетом электрической цепи. Используемая методика учитывает конструкцию и транспозицию элементарных проводников стержней по длине пазовой части якоря, расположение стержней в пазах якоря, особенности пазовой геометрии машин с косвенным охлаждением и схему соединения обмотки якоря. Основана на спрямленной модели электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения. Для параметров обмоток обобщенной электрической машины в статье представлены зависимости потерь в стержнях обмотки, коэффициентов добавочных потерь (Фильда) и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния от размеров элементарных проводников и геометрических размеров пазов. Проведен анализ влияния изменения данных параметров на энергетические и динамические характеристики машины. Сопоставление полученных результатов дает предпосылки к выполнению поиска оптимальных размеров пазовой геометрии.

Ключевые слова: электрическая машина, обмотка якоря с косвенным охлаждением, транспозиция элементарных проводников, моделирование магнитного поля переменных токов, моделирование процессов в элементарных проводниках обмотки якоря, цепно-полевая постановка, потери, индуктивные сопротивления рассеяния, спрямленная модель электрической машины.

Для цитирования:

Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Результаты вариантного расчета магнитного поля, токов, потерь и индуктивности рассеяния в стержневой обмотке якоря с косвенным охлаждением электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 85–96. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31207>



*E.F. Kadi-Ogly*¹ ✉, *N.V. Korovkin*²

¹ “Turbine Technology AAEM”, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

RESULTS OF VARIANT CALCULATIONS OF MAGNETIC FIELD, CURRENTS, LOSSES, AND LEAKAGE REACTANCE IN THE BAR-TYPE ARMATURE WINDING OF INDIRECTLY COOLED AC ELECTRICAL MACHINE BASED ON FIELD-CIRCUIT FORMULATION

Abstract. The article presents the results of variant calculations of magnetic field, currents, losses, and leakage reactances in the slot parts of bar-type armature winding of indirectly cooled AC electrical machines performed on the base of finite element analysis of AC magnetic field problem in a 2D formulation considering electric circuit. The implemented method accounts for the design and transposition of the strands of the bars along the length of the armature slot part, the location of the bars in the armature slots, the features of the indirectly cooled machine slot geometry and the diagram of armature winding connections. The method is based on straighten model of generalized electrical machine, which allows to simplify the problem without considerable loss of the solution accuracy. For the parameters of the windings of a generalized electrical machine, the article presents the dependences of losses in the winding bars, coefficients of stray losses (Field factors) and slot leakage reactances on the dimensions of the strands and geometric dimensions of the slots. An analysis of the impact of parametric variations on the efficiency and dynamic characteristics of the machine is carried out. A comparison of the obtained results provides prerequisites for searching for the optimal dimensions of slot geometry.

Keywords: electrical machine, armature winding with indirect cooling, strand transposition, AC magnetic field simulation, simulation of processes in strands of the armature winding, field-circuit formulation, losses, leakage reactances, straighten model of an electrical machine.

Citation:

Kadi-Ogly E.F., Korovkin N.V., Results of variant calculations of magnetic field, currents, losses, and leakage reactance in the bar-type armature winding of indirectly cooled AC electrical machine based on field-circuit formulation, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 85–96, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31207>

Введение. Важную роль при проектировании современных электроэнергетических машин играют электромагнитные параметры, которые являются ключевыми для формирования энергетических показателей и обеспечения номинальных и переходных характеристик оборудования энергоблоков электрических станций [1–3]. Они определяют экономичность и надежность оборудования, уровень капиталовложений в реализацию проектной части машинных залов, влияют на выбор электрического оборудования и вспомогательных систем, себестоимость технического обслуживания и эксплуатации. Поэтому задача оценки данных параметров и построения их зависимостей при вариации конструкции ключевых узлов на основании современного опыта численного анализа магнитных полей электрических машин является актуальной.

Известные работы отечественных и зарубежных авторов [4–6] базируются на анализе данных процессов аналитическими методами расчета. Современный этап развития науки в большей степени характеризуется применением методов по решению задач в трехмерной постановке [7–9,

11]. Вместе с тем методики расчета магнитных полей переменного тока, базирующиеся на двумерной [17, 18] и двумерной цепно-полевой постановках [12–15], не утратили своей актуальности ввиду их значительной простоты по сравнению с трехмерными, что важно при проведении многовариантных расчетов и оптимизационных исследований в достаточно короткие сроки на более низких мощностях ЭВМ.

В данной статье представлены результаты вариантного расчета потерь в стержневых обмотках якоря (пазовой части) и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния электрических машин переменного тока с косвенным охлаждением. Расчет выполнен на основе моделирования магнитного поля переменных токов методом конечных элементов в плоскопараллельной (двумерной) цепно-полевой постановке [12–15]. Используемая методика учитывает особенности конструкции и транспозиции элементарных проводников по длине исследуемой области стержней, их расположение в сердечнике якоря, структуру «выкладки» пазов электрических машин с косвенным охлаждением, а также схему соединения обмотки якоря [15]. Она основана на спрямленной модели электрической машины, которая позволяет упростить задачу без значительной потери точности решения [14].

Формулировка задачи и математическая модель расчета магнитного поля

В качестве базы для построения методики принята задача магнитного поля переменных токов, в основе которой лежат уравнения Максвелла во временной области. Для их решения использован метод комплексных переменных, где функции являются комплексными отображениями гармонически изменяющихся величин с частотой f [12–15].

В двумерной плоскопараллельной постановке (x, y) задача сформулирована в символах комплексного значения векторного магнитного потенциала (все величины, кроме параметров сред, являются комплексными):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j\omega\gamma A = -\delta_{ext}, \quad (1)$$

где A – векторный магнитный потенциал; $\delta_{ext} = \gamma E$ – вектор плотности стороннего тока; $\delta_{eddy} = j\omega\gamma A$ – вектор плотности вихревого тока; μ – тензор магнитной проницаемости среды; γ – удельная электрическая проводимость среды; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота; f – частота тока; j – мнимая единица.

В методике приняты допущения, применяемые для спрямленной модели электрической машины переменного тока с косвенным охлаждением обмотки якоря [15].

Расчеты выполнены на основе обобщенной электрической машины. Данная машина имеет не отнесенные к конкретной машине эквивалентные параметры, конструктивные и физические характеристики, применимые к якорям крупных электрических машин переменного тока косвенным охлаждением и многофазными стержневыми обмотками [1, 2]. Число элементарных проводников в верхнем и нижнем стержнях принято одинаковым, но в практике мощных электрических машин с косвенным охлаждением обмотки якоря и глубокими пазами число проводников в верхнем стержне может приниматься больше, чем в нижнем. Это может быть учтено в методике при расчете конкретного типа машины. Элементы выкладки паза и их размеры (прокладки и клинья) приняты в соответствии с рекомендациями [1, 2], толщина корпусной изоляции – в соответствии с [16]. Параметры обобщенной электрической машины, принятые при вариантном расчете неизменными [15], представлены в табл. 1.

При выборе параметров стержней якоря электрических машин специалисты задают их сечение, исходя из обеспечения плотности тока без учета вытеснения тока в элементарных проводниках

Таблица 1

Параметры обобщенной электрической машины

Table 1

Parameters of generalized electrical machine

Параметр	Величина	Размерность
Номинальное напряжение, U_n	10,5	кВ
Номинальный ток, I_n	1050	А
Соединение обмотки	звезда	
Частота переменного тока	50	Гц
Число фаз обмотки якоря, m	3	
Число пазов якоря, Z_1	12	–
Число пар полюсов, $2p$	2	–
Укорочение обмотки	5/6	–
Число витков фазы обмотки, w	2	–
Число стержней в пазу, S_n	2	–
Число параллельных ветвей обмотки, a	2	–
Число элементарных проводников в стержне, G	12	–
Транспозиция пазовой части стержней	360	градусы
Диаметр расточки якоря, D_1	198	мм
Внешний диаметр якоря, D_1'	378	мм
Воздушный зазор, δ	10	мм
Длина пазовой части якоря, L_z	1200	мм

(сторонняя плотность тока δ_{ext} в уравнении (1)), которая в первом приближении определяет тепловую нагрузку якоря $AS \cdot \delta_{ext}$, где AS – линейная токовая нагрузка [1, 2]. Величина плотности тока выбирается, исходя из типа системы охлаждения, и для высоковольтных обмоток якоря с косвенным охлаждением она принимается не выше 3 А/мм².

В настоящей работе расчеты выполнены на основании вариации размеров элементарных проводников в стержнях якоря обмотки при обеспечении необходимого уровня плотности тока в стержне $\delta_{ext} \leq 3$ А/мм². Высота a и ширина b , а также радиусы закругления на углах сечения проводников выбирались из ряда рекомендованных ГОСТ 22301-77 (актуализирован 06.04.2015). Высота h_n и ширина паза b_n обмотки якоря рассчитаны с учетом постоянства параметров, приведенных в табл. 1, с рекомендациями [1, 2, 15, 16]. Перечисленные параметры представлены в табл. 2. Геометрический пример изменения конфигурации пазов от варианта к варианту представлен на рис. 1.

Конечно-элементная модель спрямленной машины с подключенной электрической цепью

Конечно-элементная модель данной задачи построена на основе методики, описанной в [12, 15]. При этом принято, что ширина модели определяется длиной окружности расточки якоря обобщенной машины πD_1 ; размеры пазов варьируются в зависимости от варианта (в соответствии с табл. 1 и 2); ширина зубца якоря определяется разницей между зубовым шагом $t_1 = \frac{\pi D_1}{Z_1}$, который остается постоянным, и шириной паза якоря b_n . Число расчетных

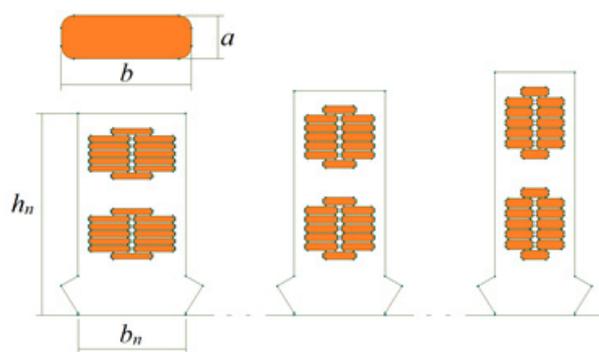


Рис. 1. Геометрический пример изменения конфигурации пазов
Fig. 1. Geometrical example of slot structure modification

Таблица 2

Параметры конфигурации пазов обмотки якоря

Table 2

Parameters of slots structure of armature winding

№ п/п	a , мм	b , мм	$S_{\text{пр}}$, мм ²	δ_{ext} , А/мм ²	b_n , мм	h_n , мм
1	1,5	10	14,79	2,96	26	49
2	1,6	9,5	14,99	2,92	25	50,4
3	1,7	9	14,94	2,93	24	51,8
4	1,8	8,5	14,94	2,93	23	53,2
5	1,9	8	14,84	2,95	22	54,6
6	2	7,5	14,64	2,99	21	56
7	2,12	7,1	14,69	2,98	20,2	57,68
8	2,24	6,7	14,65	2,99	19,4	59,36

сечений соответствует количеству элементарных проводников, которые транспонируются отдельно в рамках одного стержня.

Конечно-элементная модель задачи для варианта № 1 (табл. 2) представлена на рис. 2.

Каждое из сечений моделирует «срез» по длине якоря машины, на котором определенные проводники в пределах стержня занимают положение в пазу в зависимости от их перемещения при транспозиции ($0, 30^\circ, \dots, 360^\circ$). Переходы элементарных проводников в рамках одного стержня между сечениями происходят дискретно. На верхней и нижней границах каждого сечения модели устанавливается граничное условие Дирихле равенства нулю нормальной составляющей поля ($A = 0$). На боковых границах модели устанавливаются периодические граничные условия (*Aperiod*).

Связь между сечениями конечно-элементной модели осуществляет «соединенная» с ней электрическая цепь, моделируя электрическое соединение между элементарными проводниками, расположенными в различных сечениях.

На рис. 3 представлена данная электрическая цепь, реализованная в программном комплексе ELCUT [11].

Цепь представляет собой 3 фазы, соединенные в звезду, в каждой из которых содержится 1152 элемента, соединенных последовательно в каждой ветви (количество соответствует числу сечений

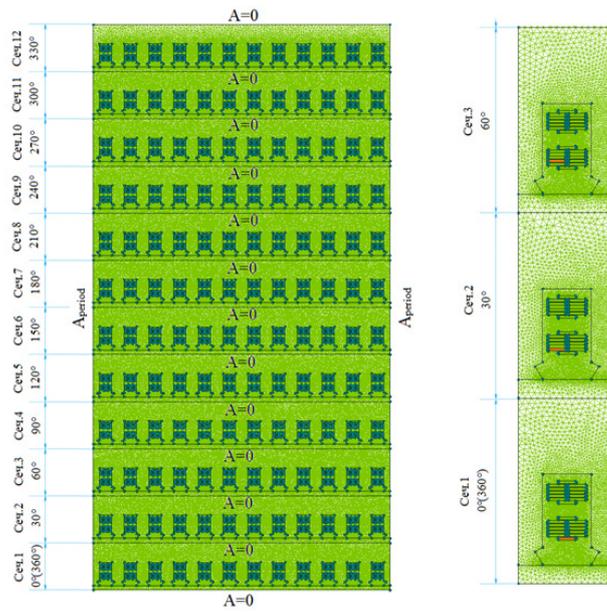


Рис. 2. Геометрическая модель и конечно-элементная дискретизация поперечного сечения спрямленной электрической машины

Fig. 2. Geometrical model and finite-element meshing of cross section of straighten electrical machine

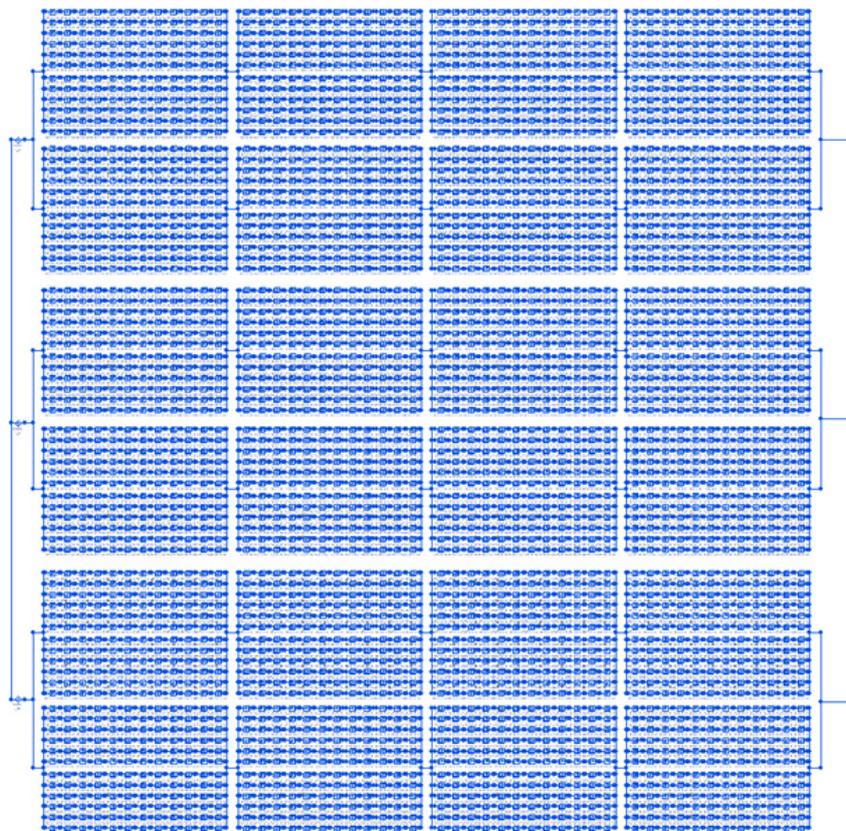


Рис. 3. Электрическая цепь модели, реализованная в программном комплексе ELCUT [10]

Fig. 3. Electrical circuit of the model realized in ELCUT software [10]

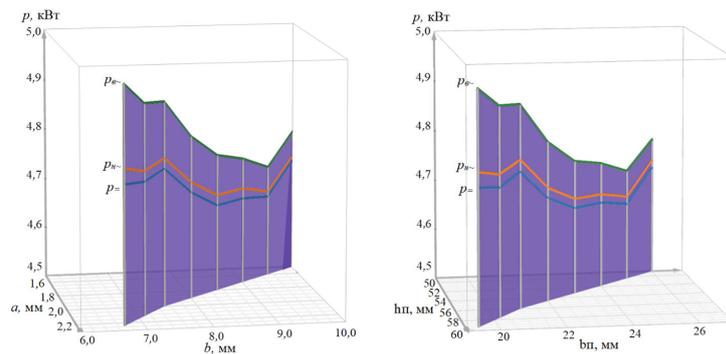


Рис. 4. Потери в обмотке якоря

Fig. 4. Losses in armature winding

— участков транспозиции с шагом 30°), соединенных параллельно в составе стержня (количество соответствует числу проводников в стержне), соединенных последовательно в составе фазы (количество соответствует числу витков в фазе), соединенных параллельно в составе обмотки (количество соответствует числу параллельных ветвей обмотки). Фазы обмотки статора питаются симметрично от источников тока, которые имеют амплитудное значение $I_n \sqrt{2} A$.

Результаты расчета

Целевыми параметрами в данной работе, определяемыми путем расчета поля при вариации конфигурации пазов, являются потери в обмотке якоря, коэффициенты вытеснения тока (Фильда) и индуктивное сопротивление пазового рассеяния обмотки якоря.

Потери в обмотке якоря (мощности тепловыделения) и коэффициенты Фильда определены на основании расчета поля и методов, описанных в [13–15], где коэффициент Фильда равен отношению потерь при переменном токе к потерям на постоянном.

Индуктивное сопротивление пазового рассеяния X_n определяется на основании величины потока пазового рассеяния Φ_n , полученного путем интегрирования через контур, заданный по высоте паза от дна паза до нижней границы модели [15]. Величина индуктивного сопротивления

пазового рассеяния равна: $X_n = \omega \frac{\Phi_n w G}{I} \frac{I_n \sqrt{3}}{U_n}$, где I — величина действующего значения фазного тока якоря [15].

На рис. 4 представлены зависимости потерь при постоянном токе (p_{\sim}) и потерь при переменном токе в верхнем (p_{\sim}) и нижнем (p_{\sim}) стержне, на рис. 5 — коэффициенты Фильда для верхних ($k_{ФВ}$) и нижних стержней ($k_{ФН}$), а на рис. 6 — индуктивное сопротивление пазового рассеяния (X_n) в зависимости от ширины и высоты элементарного проводника и ширины и высоты паза, построенные на основании расчета вариантов выкладки паза (пазовой геометрии) обобщенной машины.

Кривая изменения потерь в обмотке якоря (рис. 4) соответствует физическим представлениям, что с ростом высоты элементарных проводников стержней растут добавочные потери в обмотке якоря. Экстремальные (пиковые) величины потерь на графиках обусловлены изменением сторонней плотности тока δ_{ext} , определяемой непостоянством сечений проводников, размеры которых определяются стандартной номенклатурой ГОСТ 22301-77. Диапазон изменения потерь в верхних стержнях составляет $4,72 \div 4,95$ кВт, а нижних — $4,67 \div 4,69$ кВт. При этом потери в верхних стержнях выше, чем в нижних, что также обусловлено физическим представлением, что из-за вытеснения поля из паза в сторону воздушного зазора машины число потокоцеплений верхних стержней выше, чем у нижних [1, 2, 15] (рис. 7). Омические потери (потери при постоянном токе), определяемые сторонней плотностью тока, соответствуют данным табл. 2.

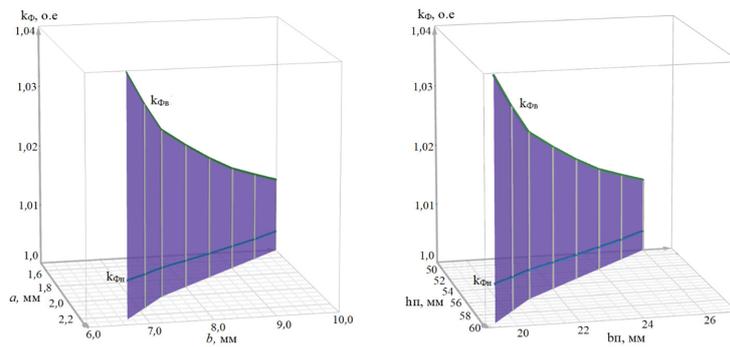


Рис. 5. Коэффициенты Фильда
Fig. 5. Field's coefficients

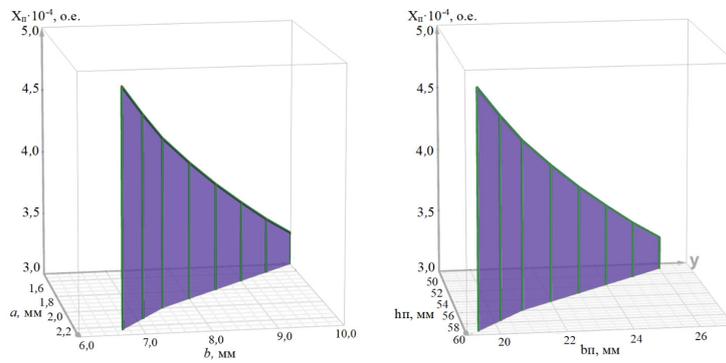


Рис. 6. Индуктивные сопротивления пазового рассеяния
Fig. 6. Slot leakage reactance

Коэффициенты Фильда описывают степень изменения добавочных потерь в обмотке при питании ее переменным током с учетом разницы числа потокосцеплений в верхних и нижних стержнях (рис. 7). Причем коэффициент Фильда верхних стержней изменяется в диапазоне $1,012 \div 1,039$, а нижних — $1,003 \div 1,006$. Меньшие значения коэффициентов Фильда соответствуют меньшей высоте элементарного проводника, а их максимальные значения — большей высоте.

Величина магнитного потока пазового рассеяния по высоте паза не является постоянной, а увеличивается в сторону воздушного зазора машины (рис. 7). Величина индуктивного сопротивления определяется результирующим значением данного потока. Поток пазового рассеяния обмотки якоря зависит от величины магнитного сопротивления паза, которое при увеличении высоты и снижении ширины паза уменьшается. Вследствие этого изменение индуктивного сопротивления, пропорционального данному потоку, имеет тот же характер. Расчетная величина индуктивного сопротивления пазового рассеяния, выполненного при вариации пазовой геометрии обобщенной машины, имеет диапазон $(3,25 \div 4,84) \cdot 10^{-4}$ о.е.

При сопоставлении полученных результатов расчета необходимо принимать во внимание, что рост потерь при увеличении высоты элементарных проводников приводит к увеличению потерь короткого замыкания электрической машины и снижению КПД машины, но увеличение индуктивного сопротивления пазового рассеяния при увеличении высоты паза (увеличении высоты элементарных проводников) в совокупности со снижением ширины паза (уменьшением ширины элементарных проводников) снижает величину тока короткого замыкания машины. Данный факт дает первые предпосылки к выполнению поиска оптимальных размеров пазовой геометрии машины.

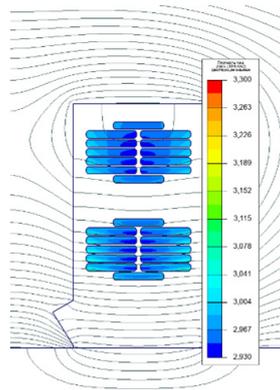


Рис. 7. Распределение магнитного поля пазового рассеяния [15]

Fig. 7. Pattern of slot leakage magnetic field [15]

Заключение

1. В данной статье представлены результаты вариантного расчета распределения магнитного поля, токов, потерь и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния обмотки якоря электрической машины переменного тока с косвенным охлаждением на основе спрямленной модели с присоединенной электрической цепью обмотки. Расчеты выполнены для различных вариантов размеров элементарных проводников и пазовой геометрии якоря машины.

2. Для параметров обмоток обобщенной электрической машины построены зависимости потерь в стержнях обмотки, коэффициентов добавочных потерь (Фильда) и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния от размеров элементарных проводников и геометрических размеров пазов. Представленные результаты соответствуют физическим представлениям о процессах в обмотках якоря машин переменного тока и о влиянии варьируемых параметров обмоток на характеристики машины.

3. Сопоставление полученных результатов расчета потерь в обмотке якоря и индуктивных сопротивлений пазового рассеяния статора дает предпосылки к выполнению поиска оптимальных размеров пазовой геометрии машины.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Домбровский В.В., Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л.: Энергия, 1974. 504 с.
- [2] Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. Л.: Энергия, 1967. 895 с.
- [3] Klemper G., Kerzenbaum I. Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, NJ: IEEE Press, 800 p.
- [4] Haldemann J. Transposition in stator bars of large turbogenerators, IEEE Transactions on Energy Conversion, 19 (3) (2004) 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>
- [5] Iseli M.A., Reichert K., Neidhöfer G. Calculation of current distribution and stray losses in arbitrarily transposed stator coils, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, 2 (1988) 47–52.
- [6] Бобков Ю.А. Метод исследования транспозиции проводников стержня обмотки статора по обобщенным схемам // Электричество. 1987. № 8. С. 55–58.
- [7] Дергачев П.А., Венцеров М.С., Астафьев В.В. Моделирование потерь в пазовой части обмотки статора турбогенератора с транспозицией элементарных проводников // Интеллектуальная электротехника. 2023. Т. 24, № 4. С. 4–17. DOI: https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_4_04

- [8] Ryzhov V.V., Molokanov O.N., Dergachev P.A., Osipkin S.V., Kurbatova E.P., Kurbatov P.A. Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics, 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] Кади-Оглы Е.Ф., Шуваев И.Н. Моделирование электромагнитного поля стержней обмотки статора электрических машин с различными типами транспозиции проводников // Электрические станции. 2022. № 11. С. 46–51. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [10] Бутырин П.А., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. 2014. № 10. С. 66–71.
- [11] Zhang L., Liang Y. A new four-row integral transposition method of stator windings and circulating current loss reduction in large turbo generators, IET Electric Power Applications, 17(1) (2023) 124–133. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12259>
- [12] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе цепно-полевой постановки // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 2. С. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>
- [13] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В., Ильин И.В. Разработка методики расчета электромагнитного поля, токов и потерь в транспонированных стержнях обмотки якоря // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2024. № 3. С. 81–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002331024030054>
- [14] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов и потерь в обмотке якоря электрической машины переменного тока на основе спрямленной модели // Энергетик. 2024. № 9. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.71527/EP.EN.2024.09.001>
- [15] Кади-Оглы Е.Ф., Коровкин Н.В. Методика расчета магнитного поля, токов, потерь и индуктивности рассеяния в стержневой обмотке якоря с косвенным охлаждением электрической машины переменного тока на основе спрямленной модели // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. XX–XX. DOI:
- [16] Ярошня Е.И., Пак В.М., Окнин Н.С., Погодина Ж.П. Разработка и исследование терморезистивной системы изоляции высоковольтных электрических машин // Электротехника. 1997. № 12. С. 40–45.
- [17] Selema A., Ibrahim M.N., Sergeant P. Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines, Machines, 10 (5) (2022) 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050328>
- [18] Hebala A., Nuzzo S., Connor P.H., Volpe G., Gerada C., Galea M. Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors, Machines, 10 (9) (2022) 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАДИ-ОГЛЫ Евгений Федорович – директор по электроэнергетическому оборудованию, «Турбинные технологии ААЭМ», канд. техн. наук.
E-mail: e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

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>

REFERENCES

- [1] **V.V. Dombrovskii, G.M. Khutoretskii**, *Osnovy proektirovaniia elektricheskikh mashin peremennogo toka* [Fundamentals of designing AC electrical machines], Leningrad: Energiia, 1974. 504 p.
- [2] **V.V. Titov, G.M. Khutoretskii, G.A. Zagorodnaia et al.**, *Turbogeneratory. Raschet i konstruktsiia* [Turbogenerators. Calculation and design], Leningrad: Energiia, 1967. 895 p.
- [3] **G. Klempner, I. Kerzenbaum**, *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance*, NJ: IEEE Press, 800 p.
- [4] **J. Haldemann**, Transposition in stator bars of large turbogenerators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19 (3) (2004) 553–560. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832067>
- [5] **M.A. Iseli, K. Reichert, G. Neidhöfer**, Calculation of current distribution and stray losses in arbitrarily transposed stator coils, *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines*, 2 (1988) 47–52.
- [6] **Iu.A. Bobkov**, Metod issledovaniia transpozitsii provodnikov sterzhnia obmotki statora po obobshchennym skhemam [Method of studying the transposition of the conductors of the stator winding rod using generalized schemes], *Elektrichestvo* [Electricity], 8 (1987) 55–58.
- [7] **P.A. Dergachev, M.S. Ventsev, V.V. Astafjev**, Modeling of losses in stator windings slot part of turbogenerator with transposition of strands, *Smart Electrical Engineering*, 4 (2023) 4–17. DOI: https://doi.org/10.46960/2658-6754_2023_4_04
- [8] **V.V. Ryzhov, O.N. Molokanov, P.A. Dergachev, S.V. Osipkin, E.P. Kurbatova, P.A. Kurbatov**, Three-dimensional mathematical simulation of the stator slot of a turbogenerator, including thermal modeling and flow fluid dynamics, 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), (2021) 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELMA52514.2021.9502987>
- [9] **E.F. Kadi-Ogly, I.N. Shuvaev**, Simulation of electromagnetic field of stator winding bars with different types of strands transposition, *Electrical Stations*, 11 (2022) 46–51. DOI: <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2022.1096.11.006>
- [10] **P.A. Butyrin, S.D. Dubitskii, N.V. Korovkin**, The Use of Computer Modeling in Teaching the Electromagnetic Field Theory, *Elektrichestvo* (Electricity), 10 (2014) 66–71.
- [11] **L. Zhang, Y. Liang**, A new four-row integral transposition method of stator windings and circulating current loss reduction in large turbo generators, *IET Electric Power Applications*, 17 (1) (2023) 124–133. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12259>
- [12] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine based on field-circuit formulation, *Global Energy*, 30 (02) (2024) 22–34, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30201>
- [13] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin, I.V. Ilin**, Development of method to calculate the distribution of the magnetic field, currents and losses in transposed bars of armature winding, *Izvestiâ Akademii nauk SSSR. Ènergetika*, 3 (2024) 81–95. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002331024030054>
- [14] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method of magnetic field, currents and losses in the armature winding of AC electrical machine on based of straighten model, *Energetik*, 9 (2024) 3–8. DOI: <https://doi.org/10.71527/EP.EN.2024.09.001>
- [15] **E.F. Kadi-Ogly, N.V. Korovkin**, Calculation method for magnetic field, currents, losses, and leakage reactance in the bar-type armature winding of indirectly cooled ac electrical machine based on straighten model, *Global Energy*, 31 (02) (2025) XX–XX. DOI:
- [16] **E.I. Iaroshenia, V.M. Pak, N.S. Oknin, Zh.P. Pogodina**, *Razrabotka i issledovanie termoreaktivnoi sistemy izoliatsii vysokovol'tnykh elektricheskikh mashin* [Development and research of thermosetting insulation system of high-voltage electrical machines], *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 12 (1997) 40–45.
- [17] **A. Selema, M.N. Ibrahim, P. Sergeant**, Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines, *Machines*, 10 (5) (2022) 328. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10050328>

[18] A. Hebala, S. Nuzzo, P.H. Connor, G. Volpe, C. Gerada, M. Galea, Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors, Machines, 10 (9) (2022) 780. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10090780>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgeny F. KADI-OGLY – *“Turbine technologies AAEM”*.

E-mail: e.f.kadi-ogly@aaemturbines.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6042-8195>

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

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

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

Поступила: 13.05.2025; Одобрена: 19.06.2025; Принята: 27.06.2025.

Submitted: 13.05.2025; Approved: 19.06.2025; Accepted: 27.06.2025.

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31208>



А.В. Репнин ✉, Е.В. Борисов, А.А. Попович

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

✉ repnin_arseniy@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ СЛОЕВ В МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СПЛАВОВ INCONEL 718 И Ti6Al4V МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация. Целью данной работы является исследование мультиматериала Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb, изготовленного методом селективного лазерного плавления (СЛП). Для этого необходимо провести исследование формирования микроструктуры, химического и фазового состава, а также твердости переходной зоны мультиматериальных образцов, определить влияние использования переходных слоев на механические свойства мультиматериальных образцов. В областях сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 отсутствуют значительные дефекты, но они встречаются в областях Cu и Nb, а также в переходной зоне Cu/Nb. Переходные зоны Ti6Al4V/Nb и Inconel 718/Cu имеют достаточно резкий переход по изменению химического состава. Схожая картина наблюдается в переходной зоне Ti6Al4V/Cu, а в переходной зоне Nb/Cu присутствует постепенный переход от одного элемента к другому. Наблюдается эффект формирования островковой макро-сегрегации во всех переходных зонах: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu и Inconel 718/Cu. В процессе изготовления мультиматериальных образцов не возникает каких-либо новых фаз. Мультиматериальные образцы с переходным слоем Cu+Nb имеют значения механических свойств выше, чем мультиматериальные образцы с одним переходным слоем из Cu. Предел прочности мультиматериального образца с переходным слоем из Cu достигает 790 МПа, а с переходными слоями Cu+Nb – 910 МПа, что является достаточно высокими значениями, но ниже свойств сплавов Inconel 718 или Ti6Al4V.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, мультиматериалы, переходный слой, Inconel 718, Ti6Al4V.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение о предоставлении субсидии № 075-03-2024-004).

Для цитирования:

Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А. Формирование переходных слоев в мультиматериальных изделиях из сплавов Inconel 718 и Ti6Al4V методом селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 97–113. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31208>



A.V. Repnin  , E.V. Borisov, A.A. Popovich

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

 repnin_arseniy@mail.ru

FORMATION OF INTERLAYER IN MULTI-MATERIAL INCONEL 718 AND Ti6Al4V ALLOY PRODUCTS OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING

Abstract. This study examines the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material with Cu and Cu+Nb interlayer produced by selective laser melting (SLM). To achieve this, it is important to investigate the microstructure, the chemical and phase composition, and the hardness of the interfacial zone in the multi-material samples, as well as to determine the effect of the use of interlayer on the mechanical properties of multi-material samples. It was observed that no significant defects were present in the alloy regions (Ti6Al4V and Inconel 718) of multi-materials. However, defects were identified in the Cu and Nb regions, as well as in the Cu/Nb interfacial zone. The interfacial zones of the Ti6Al4V/Nb and Inconel 718/Cu exhibited a sharp transition in the chemical composition. A comparable pattern was observed in Ti6Al4V/Cu interfacial zone, while the Nb/Cu interfacial zone exhibited a gradual transition from one element to another. The formation of island macro-segregation was observed in all interfacial zones: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu and Inconel 718/Cu. No new phases were identified in the production of the multi-material samples. The multi-material samples with the Cu+Nb interlayer exhibited enhanced mechanical properties compared with samples with Cu interlayer. The tensile strength of the multi-material sample with Cu interlayer reached 790 MPa, while with the Cu+Nb interlayer reached 910 MPa. These values are relatively high, but nevertheless lie below Inconel 718 or Ti6Al4V alloy properties.

Keywords: selective laser melting, multi-materials, interlayer, Inconel 718, Ti6Al4V.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant Agreement No. 075-03-2024-004).

Citation:

Repnin A.V., Borisov E.V., Popovich A.A., Formation of transition layers in multi-material Inconel 718 and Ti6Al4V alloy products obtained by selective laser melting, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 97–113, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31208>

Введение. Изделия с мультиматериальным строением обладают преимуществами по сравнению с изделиями с однородным строением [1]. Текущий уровень развития производственных технологий дает возможность изготавливать подобного рода изделия со сложной геометрией [2]. В основном это реализуется за счет использования новых производственных технологий [3], поскольку существующие ограничения традиционных технологий не дают в полной мере раскрыть потенциал конструирования мультиматериальных изделий [4]. Применение аддитивных технологий предоставляет возможность изготовления сложнопрофильных мультиматериальных изделий с пространственным распределением материалов по детали [5, 6]. Например, такой вид, как селективное лазерное плавление (СЛП), позволяет успешно изготавливать мультиматериальные изделия из металлов и сплавов [7]. На данный момент активно проводятся исследования таких мультиматериальных систем, как стали / медные сплавы [8–11], нержавеющие стали / жаропрочные никелевые сплавы [12–14], жаропрочные никелевые сплавы / медные сплавы [15–18] и т.д. [19–21].

Особый интерес представляет создание деталей из комбинации несвариваемых между собой сплавов, например таких как титановые сплавы и жаропрочные никелевые сплавы [22–24]. Актуальность применения данного рода изделий обусловлена требованиями к изделиям в аэрокосмической отрасли, где присутствует необходимость создания одновременно жаропрочных и легких деталей [25–27]. Основная идея, реализуемая в данном подходе, – это снижение массы изделий за счет мультиматериального строения, где часть изделия, работающая при повышенных температурах, будет состоять из жаропрочного никелевого сплава, а часть изделия, работающая при умеренных температурах, – из титанового сплава с меньшей плотностью [28, 29]. Однако стоит отметить, что возникают проблемы при изготовлении подобного рода мультиматериальных изделий – это поры, трещины, непроплавы в переходной зоне и т.д. [21]. Поэтому существует необходимость разработки методики объединения таких материалов без дефектов. Например, в своей работе M.G. Scaramuccia et al. рассматривали мультиматериальную систему Inconel 718/Ti6Al4V, полученную методом СЛП [21]. Авторы отмечают, что в данном мультиматериале возникают трещины, причиной которых может быть наличие охрупчивающего интерметаллида Ti_2Ni , когда процентное содержание сплава Inconel 718 превышает 20 масс. %. Для снижения дефектов исследователи предлагают использовать градиентный переход от сплава Ti6Al4V к сплаву Inconel 718. Q. Li в своей докторской диссертации исследовал ряд мультиматериальных систем, полученных методом СЛП, в которых одним из сплавов был титановый $\alpha+\beta$ сплав – Ti6Al4V, а вторыми сплавами – Invar и Cu10Sn [30]. Исследователь отмечает, что наличие титана в сплаве Ti6Al4V и никеля в сплаве Invar обуславливает металлургическую несовместимость – несвариваемость, приводящую к образованию хрупких интерметаллических фаз, таких как $TiNi_3$ и Ti_2Ni . Кроме того, в переходной зоне мультиматериала Ti6Al4V/Invar присутствуют интерметаллические фазы FeNi и CuNi с различными механическими свойствами, которые являются причиной образования трещин. Также в переходной зоне была найдена другая интерметаллическая фаза, такая как TiFe, которая оказывают влияние на микроструктуру и механические свойства.

Видно, что в мультиматериалах, полученных методом аддитивного производства (АП), в которых одним из элементов является сплав на основе титана, в переходной зоне возникают трещины. Причиной подобного рода трещин может быть влияние фазовых особенностей формирования переходной зоны. Для снижения подобного рода влияния в традиционных технологиях и в методах АП при получении мультиматериалов используют переходные слои. Авторы отмечают, что наличие переходного слоя снижает количество охрупчивающих интерметаллидов и стабилизирует процесс формирования мультиматериала [31–34]. В. Onuik et al. в своей работе исследовали мультиматериальные образцы системы Inconel 718/Ti6Al4V, которые были получены методом прямого лазерного выращивания (ПЛВ) [35]. Были рассмотрены три варианта получения мультиматериальных образцов: выращивание сплава Inconel 718 на Ti6Al4V, градиентное изменение состава от сплава Inconel 718 к Ti6Al4V и использование промежуточного связующего слоя между Inconel 718 и Ti6Al4V. Сплавы Ti6Al4V и Inconel 718 имеют различные термические свойства, также на границе раздела двух сплавов образуется хрупкая интерметаллическая фаза, что приводит к такому дефекту, как расслоение. Для устранения данного дефекта авторы использовали композиционный переходный слой, который представлял собой смесь карбида ванадия (VC) и сплавов Ti6Al4V и Inconel 718. Благодаря этому удалось получить бездефектный мультиматериал Inconel 718/Ti6Al4V. Композиционный переходный слой улучшил прочность соединения, предотвратив образование охрупчивающих интерметаллидов, таких как $TiNi_3$ и Ti_2Ni , а также уменьшил термические напряжения в переходной зоне. A. Thiriet et al. исследовали влияние переходного слоя из молибдена в мультиматериальном образце Ti6Al4V/Ti6Al4V-Mo/Mo-Inconel 718, полученном тем же методом ПЛВ, на снижение дефектов [36]. Было выяснено, что использование переходного слоя может стать решением проблемы

при выращивании разнородных несвариваемых в переходной зоне сплавов, но это может привести к формированию различных типов микроструктуры даже в пределах одного образца.

H.-I. Jeong et al. использовали технологию ПЛВ и рассматривали все ту же систему – Ti6Al4V/Inconel 718, – при этом выбрав переходный слой из высокоэнтропийного сплава (ВЭС) Ti-Nb-Cr-V-Ni [37]. Было выявлено, что не происходит образование и диффузия интерметаллидов из сплава Inconel 718 в Ti-Nb-Cr-V-Ni из-за быстрой стабилизации фазы. Однако между Ti-Nb-Cr-V-Ni и Ti-6Al-4V происходили образование интерметаллида Ti-Ni и его диффузия в Ti-6Al-4V. Диффузия произошла потому, что большое количество Ti содержится в ВЭС, что привело к снижению стабильности фазы. В результате анализа микроструктуры было установлено, что в областях чистых сплавов не происходит образование интерметаллидов, но они образуются в переходных зонах. На границе раздела Inconel 718 и Ti-Nb-Cr-V-Ni образовалась зона фаз Лавеса, причиной которых могла быть диффузия Ni и Cr в Ti-Nb-Cr-V-Ni из Inconel 718.

Из литературного обзора видно, что при изготовлении мультиматериалов из несвариваемых в переходной зоне возникают различного рода дефекты. Решить эту проблему можно за счет формирования переходных слоев из металлов и сплавов. Подобного рода подход успешно реализуется в традиционных технологиях и в таком методе АП, как прямой подвод энергии и материала. Исследований, связанных с формированием переходного слоя в мультиматериалах Inconel 718/Ti6Al4V, полученных методом СЛП, не так много, что обуславливает проведение дополнительных исследований. В связи с этим целью данной работы является исследование мультиматериала Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb, изготовленного методом СЛП. Для этого необходимо провести исследования формирования микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости переходной зоны мультиматериальных образцов, определить влияние использования переходных слоев на механические свойства мультиматериальных образцов.

Материалы и методы

Для получения мультиматериальных образцов Inconel 718/Ti6Al4V предлагается использовать переходной слой из Cu и Cu+Nb. Видно, что имеется сходство гранулометрического состава большинства порошков (табл. 1). Исключением является порошок Nb, который имеет более крупный гранулометрический состав. Различие в гранулометрическом составе может привести к определенным нарушениям формируемого при печати слоя.

Таблица 1

Гранулометрический состав используемых порошковых материалов

Table 1

Particle size distribution of the powder materials

Объем, %	Порошки			
	Ti6Al4V	Nb	CuCr1Zr	Inconel 718
	< мкм	< мкм	< мкм	< мкм
10	19	47	14	20
50	35	83	29	38
90	63	128	52	66

Мультиматериальные образцы Inconel 718/Ti6Al4V изготавливались на установке СЛП 3DLam Mini в атмосфере аргона на титановой платформе построения. Заводская модель 3D-принтера была модифицирована для создания мультиматериальных образцов. Была изменена

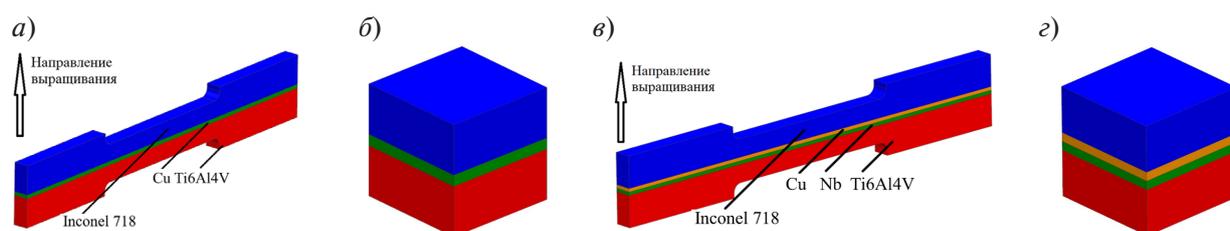


Рис. 1. Геометрия мультиматериальных образцов для проведения исследований:
a, в) образцы для испытаний на растяжение; *б, д*) образцы для металлографических исследований

Fig. 1. Geometry of the multi-material samples for the studies:
a, c) tensile test samples; *b, d*) samples for metallographic studies

система подачи порошка – добавлены дополнительный бункер для второго материала и устройство его дозирования. Кроме того, мультиматериальный модуль имеет модифицированную систему распределения второго материала. Режимы изготовления мультиматериалов для каждого сплава представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры процесса изготовления мультиматериальных образцов методом СЛП

Table 2

Process parameters of the multi-material samples production by SLM

Материалы	Параметры процесса			
	Мощность лазера	Скорость сканирования	Расстояние между проходами лазера	Толщина слоя
	Вт	мм/с	мм	мм
Ti6Al4V	275	805	0,12	0,05
Nb	275	200	0,1	0,05
CuCr1Zr	250	200	0,1	0,05
Inconel 718	275	760	0,1	0,05

Схематично образцы для проведения металлографических исследований и испытаний на растяжение представлены на рис. 1. Распределение переходных слоев было следующим: для Inconel 718/Cu/Ti6Al4V – 500 мкм Cu, Inconel 718/Cu+Nb/Ti6Al4V – 500 мкм Cu + 500 мкм Nb (в соответствии с 3D-моделью). При этом толщина Inconel 718 и Ti6Al4V в рабочей зоне образцов на растяжение составила 2,35 мм для Inconel 718/Cu/Ti6Al4V и 2,1 мм для Inconel 718/Cu/Ti6Al4V. Изготовление мультиматериалов на модифицированной установке 3DLam Mini позволяет осуществлять замену материала в основном и мультиматериальном модулях во время процесса печати с небольшой задержкой без открытия рабочей камеры установки. Такая особенность позволяет изготавливать мультиматериальные образцы более чем из двух сплавов.

Микроструктуру мультиматериальных образцов Inconel 718/Ti6Al4V изучали с помощью оптического микроскопа Leica DMi8 M (Leica Microsystems, Германия). Для травления мультиматериальных образцов использовались следующие травители: 83% дистиллированной воды, 14% HNO₃, 3% HF и 100 мл дистиллированной воды, 11 мл насыщенного водного раствора сульфата натрия, 40 г метабисульфата калия. Для изучения химического состава и проведения фрактурграфических исследований мультиматериальных образцов использовали сканирующий электронный микроскоп Mira 3 (TESCAN, Чехия) с модулем энергодисперсионной рентгеновской

спектроскопии. Фазовый состав мультиматериальных образцов анализировался на дифрактометре Rigaku SmartLab (CuK α излучение, Rigaku Corporation, Япония). Для фазового анализа данное оборудование может использовать метод рентгеновской микродифракции с шириной пучка 100 мкм. Именно благодаря использованию микродифракции появляется возможность проводить исследования непосредственно в переходных слоях между двумя сплавами. Микротвердость мультиматериальных образцов измеряли на микротвердомере по Викерсу MicroMet 5101 (Buehler Ltd, США). Для проведения механических испытаний мультиматериальных образцов использовалась универсальная одноосная испытательная машина напольного исполнения Zwick/Roell (Zwick Roell Group, Германия).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты исследований дефектов в переходных зонах мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb. Из рис. 2*a* видно, что области сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 имеют небольшое количество дефектов, которые допустимы при изготовлении изделий методом СЛП.

Однако область Cu обладает большим количеством дефектов (пор), что можно связать с низкой технологичностью данного материала из-за его физических свойств (высокая проводимость и высокая отражательная способность). В области Nb также имеется пористость, но менее выраженная. Ее причина может быть аналогична возникновению пористости в области Cu, а также причиной может быть использование более крупного порошка. При рассмотрении переходных зон Ti6Al4V/Cu (рис. 2*b*), Inconel 718/Cu (рис. 2*в*) и Ti6Al4V/Nb (рис. 2*г*) становится видно, что в них отсутствуют существенные дефекты, но имеются области взаимного перемешивания сплавов. Необходимо отметить наличие дефектов в переходной зоне Cu/Nb (рис. 2*д*). Объем дефектов незначительный, но он может оказать влияние на механические свойства. В данной переходной зоне также присутствует взаимное перемешивание сплавов. Далее данная особенность будет рассмотрена более подробно.

На рис. 3 представлены результаты исследования микроструктуры мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходным слоем из Cu и Cu+Nb. В результате травления образцов можно четко проследить эффект взаимного перемешивания элементов сплавов. Видно, что наблюдается эффект формирования островковой макросегрегации (областей перемешивания) во всех переходных зонах: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu и Inconel 718/Cu. Развитие островковой макросегрегации объясняется эффектом Марангони [38]. Эффект Марангони возникает, когда повышенная температура в центральной области бассейна расплава вызывает снижение поверхностного натяжения, в результате чего расплавленный металл течет в обратном направлении. Постоянный приток энергии усиливает обратный поток, в результате чего он возвращается в центр бассейна расплава, образуя завихрения [39]. Из-за быстрого охлаждения и недостаточного времени для распределения химических элементов возникают неоднородности, приводящие к образованию островковой макросегрегации в вихревых потоках [34].

Образование островковой макросегрегации скорее можно отнести к отрицательному фактору, так как в подобного рода зонах возможно образование нежелательных фаз, например охрупчивающих интерметаллидов [40]. Предположительно снизить количество островковой макросегрегации возможно за счет подбора режимов печати с более низкой объемной плотностью энергии. Однако при этом необходимо учитывать, что слишком низкая плотность энергии может привести к образованию дефектов (непроплаву). Для более точного понимания того, как параметры процесса оказывают влияние на образование островковой макросегрегации в мультиматериалах, необходимо проведение дополнительных исследований.

На рис. 4 представлены результаты исследований химического состава мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходным слоем из Cu и Cu+Nb. Видно, что наблюдается достаточно

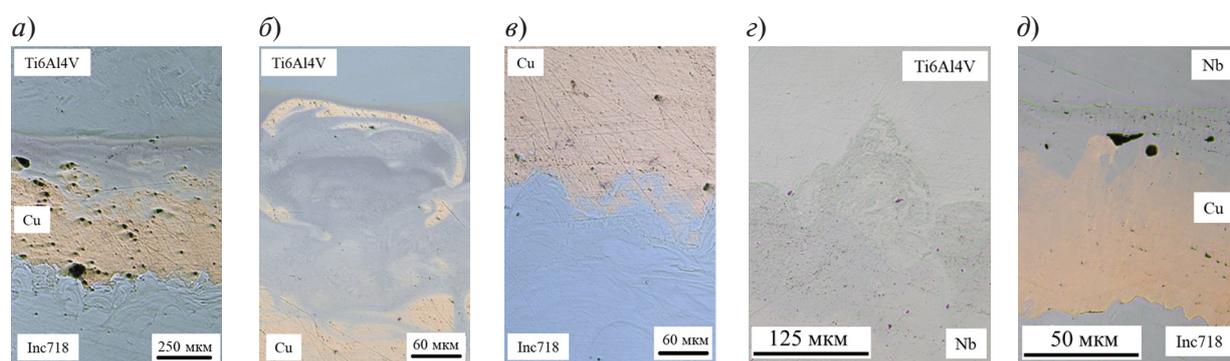


Рис. 2. Исследование дефектов в переходных зонах мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) переходная зона Ti6Al4V/Cu/Inconel 718; б) переходная зона Ti6Al4V/Cu; в) переходная зона Inconel 718/Cu; г) переходная зона Ti6Al4V/Nb; д) переходная зона Nb/Cu/Inconel 718

Fig. 2. Defect analysis in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Ti6Al4V/Cu/Inconel 718 interfacial zone; б) Ti6Al4V/Cu interfacial zone; в) Inconel 718/Cu interfacial zone; г) Ti6Al4V/Nb interfacial zone; д) Nb/Cu/Inconel 718 interfacial zone

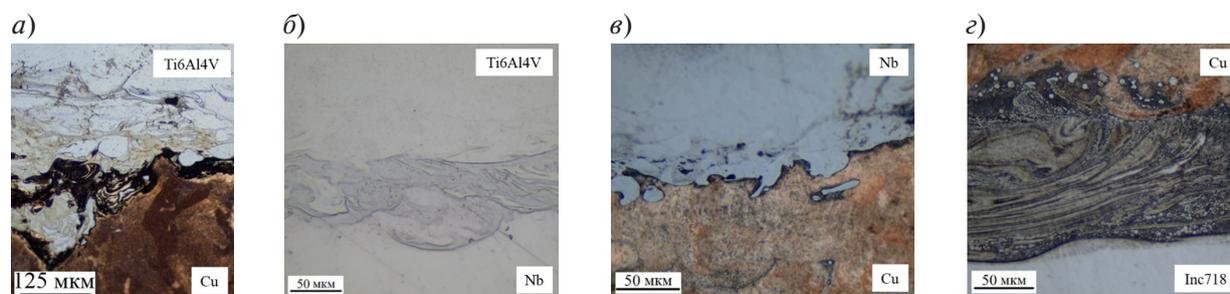


Рис. 3. Исследование микроструктуры в переходных зонах мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) переходная зона Ti6Al4V/Cu; б) переходная зона Ti6Al4V/Nb; в) переходная зона Nb/Cu; г) переходная зона Inconel 718/Cu

Fig. 3. Microstructure analysis in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Ti6Al4V/Cu interfacial zone; б) Ti6Al4V/Nb interfacial zone; в) Nb/Cu interfacial zone; д) Inconel 718/Cu interfacial zone

резкий переход по изменению химического состава от Inconel 718 к Cu (рис. 4а). При этом количество самой меди изменяется более плавно, как и при ее переходе к Ti6Al4V. Здесь необходимо точнее описать понятие «переходная зона» – это зона на границе раздела двух материалов, в которой наблюдается непостоянство химического состава (отличного от заданного состава сплава или металла). Резкое изменение химического состава может говорить о том, что переходная зона имеет небольшую ширину, а более плавное изменение – об увеличенной ширине. Можно предположить, что переходная зона между Cu и Ti6Al4V будет больше, чем между Cu и Inconel 718. Также видно, что в переходной зоне Ti6Al4V/Cu возникают области с более глубоким перемешиванием металлов (рис. 4а). Неравномерность перемешивания компонентов сплавов может быть вызвана выбранной стратегией сканирования слоя. На каждом новом слое сканирование происходило с поворотом, что могло вызвать неравномерность проплавления слоев.

Так же, как и в переходной зоне Inconel 718/Cu, в Ti6Al4V/Nb имеется достаточно резкий переход (рис. 4б). Противоположная картина наблюдается в переходной зоне Nb/Cu, где присутствует постепенный переход от одного элемента к другому, что подтверждается изображением исследуемой области. Видно, что форма областей перемешивания соответствует форме

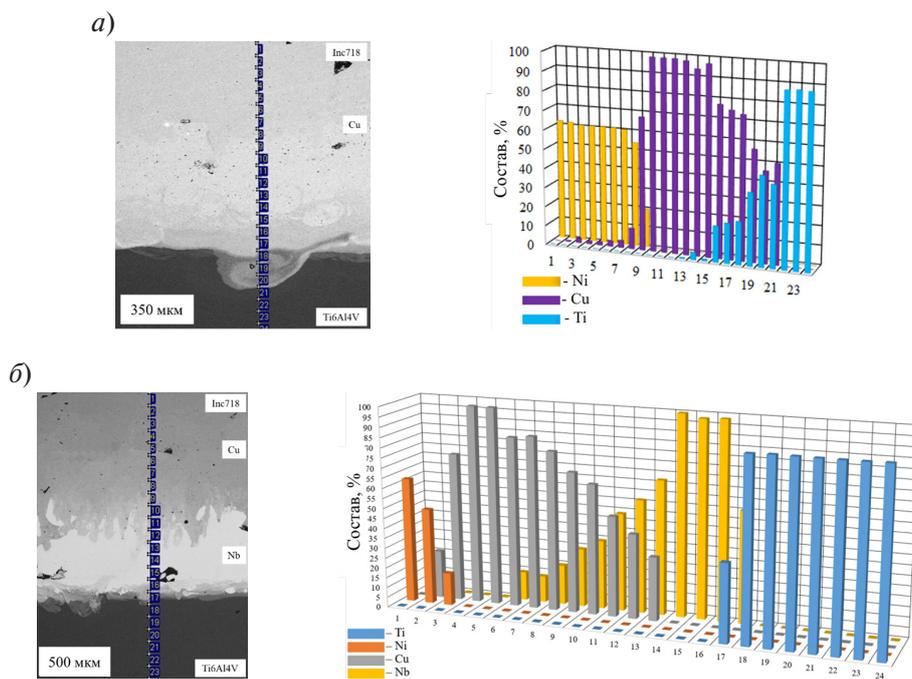


Рис. 4. Исследование химического состава мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) мультиматериал Inconel 718/Cu/Ti6Al4V; б) мультиматериал Inconel 718/Cu+Nb/Ti6Al4V

Fig. 4. Chemical composition study in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Inconel 718/Cu/Ti6Al4V multi-material sample; б) Inconel 718/Cu/Nb/Ti6Al4V multi-material sample

бассейна расплава, когда плавление слоя порошка происходит в режиме «замочной скважины» [41]. Также можно отметить, что вблизи границы Ti6Al4V/Nb и Nb/Cu имеются дефекты – раковины. Они могут образовываться по причине несоответствия параметров процесса составу, который возникает из-за перемешивания металлов и сплавов. Дополнительной причиной может быть то, что параметры для Nb и Cu имеют достаточно высокие значения объемной плотности энергии, и изменение состава может оказывать более существенное влияние на дефектообразование. Наличие переходной зоны носит двойственный характер. С одной стороны, ее присутствие снижает количество концентраторов напряжений, которые могут возникать в случае резкой границы раздела материалов. С другой стороны, при смешивании двух составов возможно образование дефектов из-за несоответствия параметров печати составу, а также образование нежелательных фаз.

На рис. 5 представлены результаты исследований фазового состава мультиматериалов Ti6Al4V/Inconel 718 с переходным слоем из Cu и Cu+Nb.

Из рис. 5 видно, что в процессе изготовления мультиматериальных образцов не возникает каких-либо новых фаз. В зоне сплавов присутствуют характерные для них фазы так же, как и для Cu с Nb. Взаимодействие сплавов Ti6Al4V и Inconel 718 может привести к формированию таких охрупчивающих интерметаллидов, как $TiNi_3$ и Ti_2Ni . Однако они не наблюдаются на полученных дифрактограммах, что может говорить либо об их отсутствии, либо об их минимальном количестве. Таким образом, можно отметить, что удалось избежать формирования охрупчивающих интерметаллидов при изготовлении мультиматериальных образцов Ti6Al4V и Inconel 718. Кроме того, взаимодействие сплава Ti6Al4V с Cu может стать причиной образования охрупчивающего интерметаллида $CuTi_2$ [42]. Однако прослойка между Ti6Al4V и Cu в виде Nb позволяет предотвратить образование данного интерметаллида.

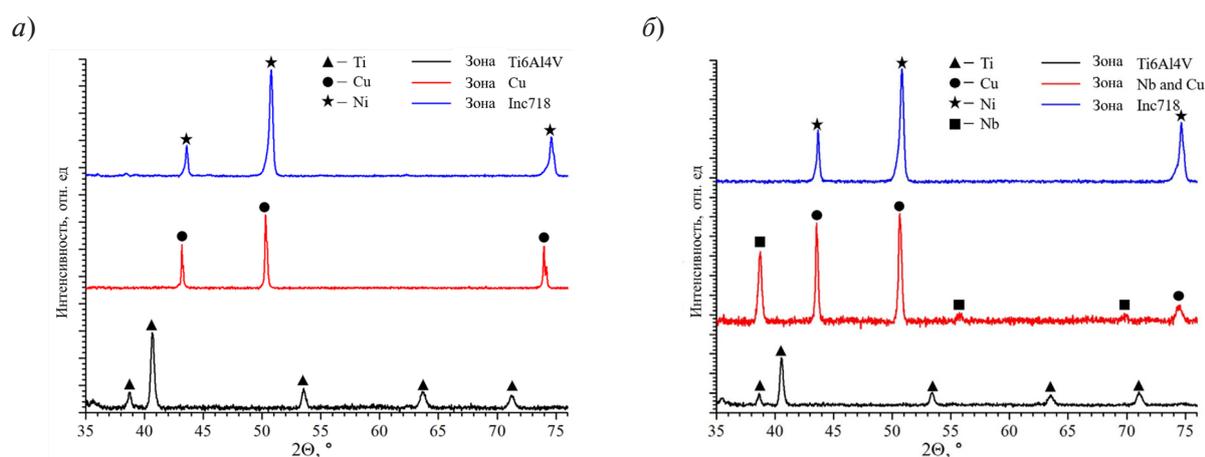


Рис. 5. Исследование фазового состава мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb: а) мультиматериал Inconel 718/Cu/Ti6Al4V; б) мультиматериал Inconel 718/Cu+Nb/Ti6Al4V

Fig. 5. Phase composition study in the interfacial zones of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material sample with Cu and Cu+Nb interlayer: а) Inconel 718/Cu/Ti6Al4V multi-material sample; б) Inconel 718/Cu/Nb/Ti6Al4V multi-material sample

По результатам анализа микротвердости мультиматериальных образцов Ti6Al4V/ Inconel 718 с переходным слоем из Cu и Cu+Nb видно, что отсутствуют резкие скачки в значениях твердости при переходах от сплава к сплаву на протяжении всего измерения. С учетом того, что был выбран достаточно мелкий шаг измерений микротвердости (100 мкм), отсутствие резких скачков подтверждает факт того, что количество интерметаллидов минимально или они отсутствуют вовсе. Говоря о полученных значениях микротвердости, можно отметить, что они соответствуют средним значениям для исследуемых сплавов. Кроме того, по изменению значений микротвердости можно отметить, что ширина переходной зоны между сплавами имеет небольшие размеры, так как не наблюдается градиентного снижения твердости, а происходит ее резкое изменение. Исключением является переходная зона Nb/Cu, так как в ней наблюдается более плавный переход, что подтверждает выводы об исследовании химического состава данной зоны (наличие широкой переходной зоны).

В табл. 3 представлены результаты исследования механических свойств мультиматериальных образцов Ti6Al4V/Inconel 718. Из результатов анализа мультиматериалов с переходным слоем из Cu видно, что между собой значения свойств отличаются несущественно, что говорит о хорошей повторяемости печати. Предел прочности достигает 790 МПа, что является достаточно высоким значением. Однако полученные результаты по значениям находятся ниже свойств Ti6Al4V и Inconel 718. Это может быть связано с наличием неконтролируемых механических свойств в переходных зонах и наличием Cu с низкими механическими свойствами. Также стоит отметить достаточно невысокий предел текучести – примерно 150 МПа. Можно предположить, что низкий предел текучести обуславливается механикой разрушения мультиматериальных образцов, когда в процессе растяжения первым в пластическое состояние переходит Cu, который имеет достаточно низкие значения механических свойств. Далее ввиду мультиматериального строения происходит переход в пластическое состояние других металлов. Возможное повышение свойств может быть достигнуто за счет проведения термической обработки и подбора более высокопрочного переходного слоя. Кроме того, можно исследовать влияние толщины слоев Cu и Nb на механические свойства. Также можно провести работу по оптимизации параметров процесса в межфазных зонах для уменьшения количества и размера островных макросегрегаций.

Таблица 3

Исследование механических свойств мультиматериалов Inconel 718/Ti6Al4V с переходными слоями из Cu и Cu+Nb

Table 3

Study of mechanical properties of the Inconel 718/Ti6Al4V multi-material samples with Cu and Cu+Nb interlayer

Переходный слой	№ образца	Свойства		
		Предел текучести	Предел прочности	Относительное удлинение
		МПа		%
Cu	1	150,02	784,23	13,74
	2	153,38	786,34	11,14
	3	147,44	792,32	10,36
	Ср. знач.	150,28±2,07	787,6±3,15	11,75±1,33
Cu+Nb	1	145,77	891,72	15,51
	2	114,06	915,93	18,91
	3	151,71	910,7	13,51
	Ср. знач.	137,18±15,41	906,11±9,6	15,98±1,96

Мультиматериальные образцы Ti6Al4V/Inconel 718 с переходным слоем из Cu+Nb имеют значения свойств выше, чем мультиматериальные образцы с одним переходным слоем из Cu. Наблюдается аналогичная картина по величине свойств – достаточно высокие значения предела прочности (достигают 910 МПа), но ниже свойств сплавов. Также аналогичной является ситуация с пределом текучести – достаточно невысокие значения. Можно выдвинуть аналогичные объяснения такого поведения мультиматериала – наличие переходных слоев из чистых металлов снижает свойства образцов. Однако стоит отметить, что присутствует повышение свойств при использовании комбинации Cu+Nb. Это может быть объяснено тем, что, хотя не было выявлено наличие охрупчивающих интерметаллидов в мультиматериале с переходным слоем Cu, они все равно могут присутствовать и снижать свойства. Кроме того, физико-термические свойства, например такие как коэффициент теплового расширения и теплопроводность между Ti6Al4V и Nb, отличаются не так существенно, как между Ti6Al4V и Cu.

Выводы

В данной работе были проведены исследования мультиматериальных образцов Inconel 718/Ti6Al4V с переходным слоем из Cu и Cu+Nb, полученных методом СЛП, в частности формирование микроструктуры, химического и фазового составов, а также твердости переходной зоны мультиматериальных образцов. Проведена оценка влияния использования переходных слоев на механические свойства мультиматериальных образцов. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) В областях сплавов (Ti6Al4V и Inconel 718) отсутствуют существенные дефекты, но они встречаются в областях Cu и Nb, а также в переходной зоне Cu/Nb. Переходные зоны Ti6Al4V/Nb и Inconel 718/Cu имеют достаточно резкий переход по изменению химического состава. Схожая картина наблюдается в переходной зоне Ti6Al4V/Cu, а в переходной зоне Nb/Cu присутствует постепенный переход от одного элемента к другому. Наблюдается эффект формирования островковой макросегрегации во всех переходных зонах: Ti6Al4V/Cu, Ti6Al4V/Nb, Nb/Cu и Inconel 718/Cu. В процессе изготовления мультиматериальных образцов не возникает каких-либо новых фаз. В зоне сплавов присутствуют характерные для них фазы так же, как и для Cu с Nb.

2) Микротвердость в зонах сплавов и металлов соответствует средним значениям для каждого из них. Изменение значений микротвердости при переходе от сплавов к чистым металлам имеет резкий переход. Однако в переходной зоне Nb/Cu наблюдается более плавный переход. Мульти материальные образцы с переходным слоем Cu+Nb имеют значения механических свойств выше, чем мульти материальные образцы с одним переходным слоем из Cu. Предел прочности мульти материального образца с переходным слоем из Cu достигает 790 МПа, а с переходными слоями Cu+Nb достигает 910 МПа, что является достаточно высокими значениями, но ниже свойств сплавов Inconel 718 или Ti6Al4V.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Vaghasia V., Parmar H., Chaudhari R., Vora J.K., Abhishek K., Kumari S.** Recent advancements in the fabrication of multi-material structures by additive manufacturing, *AIP Conference Proceedings*, 2960 (1) (2024) 030017. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0183002>
- [2] **Putra N.E., Mirzaali M.J., Apachitei I., Zhou J., Zadpoor A.A.** Multi-material additive manufacturing technologies for Ti-, Mg-, and Fe-based biomaterials for bone substitution, *Acta Biomaterialia*, 109 (2020) 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.03.037>
- [3] **Rafiee M., Farahani R.D., Therriault D.** Multi-Material 3D and 4D printing: A survey, *Advanced Science*, 7 (12) (2020) 1902307. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201902307>
- [4] **Verma A., Kapil A., Klobčar D., Sharma A.** A review on multiplicity in multi-material additive manufacturing: Process, capability, scale, and structure, *Materials*, 16 (15) (2023) 5246. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155246>
- [5] **Hasanov S., Alkunte S., Rajeshirke M., Gupta A., Huseynov O., Fidan I., Alifui-Segbaya F., Rennie A.** Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6 (1) (2022) 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>
- [6] **Han D., Lee H.** Recent advances in multi-material additive manufacturing: Methods and applications, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28 (2020) 158–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.004>
- [7] **Mussatto A.** Research progress in multi-material laser-powder bed fusion additive manufacturing: A review of the state-of-the-art techniques for depositing multiple powders with spatial selectivity in a single layer, *Results in Engineering*, 16 (2022) 100769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100769>
- [8] **Chen K., Wang C., Hong Q., Wen S., Zhou Y., Yan C., Shi Y.** Selective laser melting 316L/CuSn10 multi-materials: Processing optimization, interfacial characterization and mechanical property, *Journal of Materials Processing Technology*, 283 (2020) 116701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116701>
- [9] **Wei C., Li L., Zhang X., Chueh Y.-H.** 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting, *CIRP Annals*, 67 (1) (2018) 245–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.096>
- [10] **Chen J., Yang Y., Song C., Zhang M., Wu S., Wang D.** Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L /CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 752 (2019) 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.097>
- [11] **Chen J., Yang Y., Song C., Wang D., Wu S., Zhang M.** Influence mechanism of process parameters on the interfacial characterization of selective laser melting 316L/CuSn10, *Materials Science and Engineering: A*, 792 (2020) 139316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139316>
- [12] **Yusuf S.M., Mazlan N., Musa N.H., Zhao X., Chen Y., Yang S., Nordin N.A., Mazlan S.A., Gao N.** Microstructures and hardening mechanisms of a 316L Stainless Steel/Inconel 718 interface additively manufactured by multi-material selective laser melting, *Metals*, 13 (2) (2023) 400. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13020400>

[13] **Mei X., Wang X., Peng Y., Gu H., Zhong G., Yang S.** Interfacial characterization and mechanical properties of 316L Stainless Steel/Inconel 718 manufactured by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 758 (2019) 185–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.011>

[14] **Hinojos A., Mireles J., Reichardt A., Frigola P., Hosemann P., Murr L.E., Wicker R.B.** Joining of Inconel 718 and 316 Stainless Steel using electron beam melting additive manufacturing technology, *Materials & Design*, 94 (2016) 17–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.041>

[15] **Marques A., Cunha Â., Gasik M., Carvalho O., Silva F.S.** Bartolomeu F. Inconel 718–copper parts fabricated by 3D multi-material laser powder bed fusion: A novel technological and designing approach for rocket engine, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122 (2022) 2113–2123. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10011-x>

[16] **Walker J., Middendorf J.R., Lesko C.C.C., Gockel J.** Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing in 3-dimensions, *Manufacturing Letters*, 31 (2022) 74–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.011>

[17] **Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Шамшурин А.И.** Создание мультиматериальных образцов системы ВЖ159-БрХЦрТ методом селективного лазерного плавления // *Глобальная энергия*. 2023. Т. 29, № 2. С. 175–188. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29211>

[18] **Репнин А.В., Борисов Е.В., Попович А.А., Голубков Н.А.** Исследование механических свойств мультиматериальных образцов системы ВЖ159-БрХЦрТ, полученных методом селективного лазерного плавления // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2024. Т. 18, № 1. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>

[19] **Wang R., Gu D., Lin K., Chen C., Ge Q., Li D.** Multi-material additive manufacturing of a bio-inspired layered ceramic/metal structure: Formation mechanisms and mechanical properties, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 175 (2022) 103872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103872>

[20] **Tey C.F., Tan X., Sing S.L., Yeong W.Y.** Additive manufacturing of multiple materials by selective laser melting: Ti-alloy to stainless steel via a Cu-alloy interlayer, *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100970>

[21] **Scaramuccia M.G., Demir A.G., Caprio L., Tassa O., Previtali B.** Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718, *Powder Technology*, 367 (2020) 376–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.010>

[22] **Shang C., Wang C., Li C., Yang G., Xu G., You J.** Eliminating the crack of laser 3D printed functionally graded material from TA15 to Inconel 718 by base preheating, *Optics & Laser Technology*, 126 (2020) 106100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106100>

[23] **Wu D., Song C., Di T., Niu F., Ma G.** Intermetallic regulation mechanism of Inconel 718/Ti6Al4V composite by novel follow-up ultrasonic assisted laser additive manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, 235 (2022) 109736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109736>

[24] Meng W., Xiaohui Y., Zhang W., Junfei F., Lijie G., Qunshuang M., Bing C. Additive manufacturing of a functionally graded material from Inconel625 to Ti6Al4V by laser synchronous preheating, *Journal of Materials Processing Technology*, 275 (2020) 116368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116368>

[25] **Godec M., Malej S., Feizpour D., Donik Č., Balažić M., Klobčar D., Pambaguian L., Conradi M., Kocijan A.** Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications, *Materials Characterization*, 172 (2021) 110842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>

[26] **Marques A., Cunha A., Gasik M., Carvalho O., Silva F.S., Bartolomeu F.** 3D multi-material laser powder bed fusion: Ti6Al4V–CuNi2SiCr parts for aerospace applications, *Progress in Additive Manufacturing*, 9 (2023) 391–400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00460-5>

[27] **Song C., Ma G., He A., Li Y., Niu F., Wu D.** Multi-phases transformation mechanism of Ti6Al4V/Inconel 718 composite by laser additive manufacturing, *Materials Characterization*, 179 (2021) 111363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111363>

- [28] **Godfrey D.G., Morris M.C., Menon M.** Multi-material turbine components, U.S. Patent, No. US9266170B2 (2016).
- [29] **Rockstroh T.J., Tewari S.K., Sabato J.G., Desander D.B., Abbott D.H., Gledhill M.D.** Turbine airfoil casting method, U.S. Patent, No. US20090165988A1 (2009).
- [30] **Li Q.** A study on dissimilar metal functionally graded material via multi-material selective laser melting, PhD thesis, Manchester (UK), 2023.
- [31] **Ng C.H., Mok E.S.H., Man H.C.** Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 226 (2015) 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmat-protec.2015.06.039>
- [32] **Shamsolhodaei A., Oliveira J.P., Schell N., Maawad E., Panton B., Zhou Y.N.** Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel, *Intermetallics*, 116 (2020) 106656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106656>
- [33] **Niu H., Jiang H.C., Zhao M.J., Rong L.J.** Effect of interlayer addition on microstructure and mechanical properties of NiTi/stainless steel joint by electron beam welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 61 (2021) 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.043>
- [34] **Wang H., Xie J., Chen Y., Liu W., Zhong W.** Effect of CoCrFeNiMn high entropy alloy interlayer on microstructure and mechanical properties of laser-welded NiTi/304 SS joint, *Journal of Materials Research and Technology*, 18 (2022) 1028–1037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.022>
- [35] **Onuikie B., Bandyopadhyay A.** Additive manufacturing of Inconel 718 – Ti6Al4V bimetallic structures, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 844–851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.025>
- [36] **Thiriet A., Schneider-Maunoury C., Laheurte P., Boisselier D., Weiss L.** Multiscale study of different types of interface of a buffer material in powder-based directed energy deposition: Example of Ti6Al4V/Ti6Al4V – Mo/Mo – Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 27 (2019) 118–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.007>
- [37] **Jeong H.-I., Kim D.-H., Lee C.-M.** Multi-material deposition of Inconel 718 and Ti–6Al–4V using the Ti–Nb–Cr–V–Ni high entropy alloy intermediate layer, *Journal of Materials Research and Technology*, 29 (2024) 3217–3227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.285>
- [38] **Soysal T., Kou S., Tat D., Pasang T.** Macrosegregation in dissimilar-metal fusion welding, *Acta Materialia*, 110 (2016) 149–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.004>
- [39] **Wang P., Huang P., Ng F.L., Sin W.J., Lu S., Nai M.L.S., Dong Z.L., Wei J.** Additively manufactured CoCrFeNiMn high-entropy alloy via pre-alloyed powder, *Materials & Design*, 168 (2019) 107576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107576>
- [40] **Repnin A., Kim A., Popovich A.** Interfacial characterization of selective laser melting of a SS316L/NiTi multi-material with a high-entropy alloy interlayer, *Crystals*, 13 (10) (2023) 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13101486>
- [41] **Shrestha S., Starr T., Chou K.** A study of keyhole porosity in selective laser melting: Single-track scanning with micro-CT analysis, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141 (7) (2019) 071004. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043622>
- [42] **Fan Y., Fan J., Wang C.** Formation of typical Cu–Ti intermetallic phases via a liquid-solid reaction approach, *Intermetallics*, 113 (2019) 106577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106577>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РЕПНИН Арсений Вячеславович – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3157-3317>

БОРИСОВ Евгений Владиславович – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-6706>

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] **V. Vaghasia, H. Parmar, R. Chaudhari, J.K. Vora, K. Abhishek, S. Kumari**, Recent advancements in the fabrication of multi-material structures by additive manufacturing, *AIP Conference Proceedings*, 2960 (1) (2024) 030017. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0183002>
- [2] **N.E. Putra, M.J. Mirzaali, I. Apachitei, J. Zhou, A.A. Zadpoor**, Multi-material additive manufacturing technologies for Ti-, Mg-, and Fe-based biomaterials for bone substitution, *Acta Biomaterialia*, 109 (2020) 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.03.037>
- [3] **M. Rafiee, R.D. Farahani, D. Therriault**, Multi-Material 3D and 4D printing: A survey, *Advanced Science*, 7 (12) (2020) 1902307. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.201902307>
- [4] **A. Verma, A. Kapil, D. Klobčar, A. Sharma**, A review on multiplicity in multi-material additive manufacturing: Process, capability, scale, and structure, *Materials*, 16 (15) (2023) 5246. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155246>
- [5] **S. Hasanov, S. Alkunte, M. Rajeshirke, A. Gupta, O. Huseynov, I. Fidan, F. Alifui-Segbaya, A. Rennie**, Review on additive manufacturing of multi-material parts: Progress and challenges, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6 (1) (2022) 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6010004>
- [6] **D. Han, H. Lee**, Recent advances in multi-material additive manufacturing: Methods and applications, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 28 (2020) 158–166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.03.004>
- [7] **A. Mussatto**, Research progress in multi-material laser-powder bed fusion additive manufacturing: A review of the state-of-the-art techniques for depositing multiple powders with spatial selectivity in a single layer, *Results in Engineering*, 16 (2022) 100769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100769>
- [8] **K. Chen, C. Wang, Q. Hong, S. Wen, Y. Zhou, C. Yan, Y. Shi**, Selective laser melting 316L/CuSn10 multi-materials: Processing optimization, interfacial characterization and mechanical property, *Journal of Materials Processing Technology*, 283 (2020) 116701. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116701>
- [9] **C. Wei, L. Li, X. Zhang, Y.-H. Chueh**, 3D printing of multiple metallic materials via modified selective laser melting, *CIRP Annals*, 67 (1) (2018) 245–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.096>
- [10] **J. Chen, Y. Yang, C. Song, M. Zhang, S. Wu, D. Wang**, Interfacial microstructure and mechanical properties of 316L/CuSn10 multi-material bimetallic structure fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 752 (2019) 75–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.097>
- [11] **J. Chen, Y. Yang, C. Song, D. Wang, S. Wu, M. Zhang**, Influence mechanism of process parameters on the interfacial characterization of selective laser melting 316L/CuSn10, *Materials Science and Engineering: A*, 792 (2020) 139316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139316>
- [12] **S.M. Yusuf, N. Mazlan, N.H. Musa, X. Zhao, Y. Chen, S. Yang, N.A. Nordin, S.A. Mazlan, N. Gao**, Microstructures and hardening mechanisms of a 316L Stainless Steel/Inconel 718 interface additively manufactured by multi-material selective laser melting, *Metals*, 13 (2) (2023) 400. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13020400>

- [13] **X. Mei, X. Wang, Y. Peng, H. Gu, G. Zhong, S. Yang**, Interfacial characterization and mechanical properties of 316L Stainless Steel/Inconel 718 manufactured by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 758 (2019) 185–191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.05.011>
- [14] **A. Hinojos, J. Mireles, A. Reichardt, P. Frigola, P. Hosemann, L.E. Murr, R.B. Wicker**, Joining of Inconel 718 and 316 Stainless Steel using electron beam melting additive manufacturing technology, *Materials & Design*, 94 (2016) 17–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.041>
- [15] **A. Marques, Â. Cunha, M. Gasik, O. Carvalho, F.S. Silva, F. Bartolomeu**, Inconel 718–copper parts fabricated by 3D multi-material laser powder bed fusion: A novel technological and designing approach for rocket engine, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122 (2022) 2113–2123. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10011-x>
- [16] **J. Walker, J.R. Middendorf, C.C.C. Lesko, J. Gockel**, Multi-material laser powder bed fusion additive manufacturing in 3-dimensions, *Manufacturing Letters*, 31 (2022) 74–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.07.011>
- [17] **A.V. Repnin, A.V. Borisov, A.A. Popovich, A.I. Shamshurin**, Selective laser melting of multimaterial VZh159-CuCr1Zr samples, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 175–188, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29211>
- [18] **A.V. Repnin, A.V. Borisov, A.A. Popovich, N.A. Golubkov**, Mechanical properties of the VZh159–CuCr1Zr alloy multi-material samples manufactured by selective laser melting, *Powder Metallurgy and Functional Coatings (Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya)*, 18 (1) (2024) 52–61. DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2024-1-52-61>
- [19] **R. Wang, D. Gu, K. Lin, C. Chen, Q. Ge, D. Li**, Multi-material additive manufacturing of a bio-inspired layered ceramic/metal structure: Formation mechanisms and mechanical properties, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 175 (2022) 103872. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2022.103872>
- [20] **C.F. Tey, X. Tan, S.L. Sing, W.Y. Yeong**, Additive manufacturing of multiple materials by selective laser melting: Ti-alloy to stainless steel via a Cu-alloy interlayer, *Additive Manufacturing*, 31 (2020) 100970. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100970>
- [21] **M.G. Scaramuccia, A.G. Demir, L. Caprio, O. Tassa, B. Previtali**, Development of processing strategies for multigraded selective laser melting of Ti6Al4V and IN718, *Powder Technology*, 367 (2020) 376–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.010>
- [22] **C. Shang, C. Wang, C. Li, G. Yang, G. Xu, J. You**, Eliminating the crack of laser 3D printed functionally graded material from TA15 to Inconel 718 by base preheating, *Optics & Laser Technology*, 126 (2020) 106100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106100>
- [23] **D. Wu, C. Song, T. Di, F. Niu, G. Ma**, Intermetallic regulation mechanism of Inconel 718/Ti6Al4V composite by novel follow-up ultrasonic assisted laser additive manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, 235 (2022) 109736. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109736>
- [24] **W. Meng, Y. Xiaohui, W. Zhang, F. Junfei, G. Lijie, M. Qunshuang, C. Bing**, Additive manufacturing of a functionally graded material from Inconel625 to Ti6Al4V by laser synchronous preheating, *Journal of Materials Processing Technology*, 275 (2020) 116368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116368>
- [25] **M. Godec, S. Malej, D. Feizpour, Č. Donik, M. Balažić, D. Klobčar, L. Pambaguian, M. Conradi, A. Kocijan**, Hybrid additive manufacturing of Inconel 718 for future space applications, *Materials Characterization*, 172 (2021) 110842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110842>
- [26] **A. Marques, A. Cunha, M. Gasik, O. Carvalho, F.S. Silva, F. Bartolomeu**, 3D multi-material laser powder bed fusion: Ti6Al4V–CuNi2SiCr parts for aerospace applications, *Progress in Additive Manufacturing*, 9 (2023) 391–400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00460-5>
- [27] **C. Song, G. Ma, A. He, Y. Li, F. Niu, D. Wu**, Multi-phases transformation mechanism of Ti6Al4V/Inconel 718 composite by laser additive manufacturing, *Materials Characterization*, 179 (2021) 111363. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111363>

- [28] **D.G. Godfrey, M.C. Morris, M. Menon**, Multi-material turbine components, U.S. Patent, No. US9266170B2 (2016).
- [29] **T.J. Rockstroh, S.K. Tewari, J.G. Sabato, D.B. Desander, D.H. Abbott, M.D. Gledhill**, Turbine air-foil casting method, U.S. Patent, No. US20090165988A1 (2009).
- [30] **Q. Li**, A study on dissimilar metal functionally graded material via multi-material selective laser melting, PhD thesis, Manchester (UK), 2023.
- [31] **C.H. Ng, E.S.H. Mok, H.C. Man**, Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 226 (2015) 69–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.039>
- [32] **A. Shamsolhodaei, J.P. Oliveira, N. Schell, E. Maawad, B. Panton, Y.N. Zhou**, Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel, *Intermetallics*, 116 (2020) 106656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106656>
- [33] **H. Niu, H.C. Jiang, M.J. Zhao, L.J. Rong**, Effect of interlayer addition on microstructure and mechanical properties of NiTi/stainless steel joint by electron beam welding, *Journal of Materials Science & Technology*, 61 (2021) 16–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.05.043>
- [34] **H. Wang, J. Xie, Y. Chen, W. Liu, W. Zhong**, Effect of CoCrFeNiMn high entropy alloy interlayer on microstructure and mechanical properties of laser-welded NiTi/304 SS joint, *Journal of Materials Research and Technology*, 18 (2022) 1028–1037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.022>
- [35] **B. Onuikie, A. Bandyopadhyay**, Additive manufacturing of Inconel 718 – Ti6Al4V bimetallic structures, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 844–851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.025>
- [36] **A. Thiriet, C. Schneider-Maunoury, P. Laheurte, D. Boisselier, L. Weiss**, Multiscale study of different types of interface of a buffer material in powder-based directed energy deposition: Example of Ti6Al4V/Ti6Al4V – Mo/Mo – Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 27 (2019) 118–130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.007>
- [37] **H.-I. Jeong, D.-H. Kim, C.-M. Lee**, Multi-material deposition of Inconel 718 and Ti–6Al–4V using the Ti–Nb–Cr–V–Ni high entropy alloy intermediate layer, *Journal of Materials Research and Technology*, 29 (2024) 3217–3227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.285>
- [38] **T. Soysal, S. Kou, D. Tat, T. Pasang**, Macrosegregation in dissimilar-metal fusion welding, *Acta Materialia*, 110 (2016) 149–160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.004>
- [39] **P. Wang, P. Huang, F.L. Ng, W.J. Sin, S. Lu, M.L.S. Nai, Z.L. Dong, J. Wei**, Additively manufactured CoCrFeNiMn high-entropy alloy via pre-alloyed powder, *Materials & Design*, 168 (2019) 107576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107576>
- [40] **A. Repnin, A. Kim, A. Popovich**, Interfacial characterization of selective laser melting of a SS316L/NiTi multi-material with a high-entropy alloy interlayer, *Crystals*, 13 (10) (2023) 1486. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13101486>
- [41] **S. Shrestha, T. Starr, K. Chou**, A study of keyhole porosity in selective laser melting: Single-track scanning with micro-CT analysis, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141 (7) (2019) 071004. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4043622>
- [42] **Y. Fan, J. Fan, C. Wang**, Formation of typical Cu–Ti intermetallic phases via a liquid-solid reaction approach, *Intermetallics*, 113 (2019) 106577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.106577>

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Arseniy V. REPNIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: repnin_arseniy@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3157-3317>

Evgenii V. BORISOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: evgenii.borisov@icloud.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2464-6706>

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

Поступила: 30.10.2024; Одобрена: 08.01.2025; Принята: 10.01.2025.

Submitted: 30.10.2024; Approved: 08.01.2025; Accepted: 10.01.2025.

Научная статья

УДК 620.172.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>



Д.Р. Кравцов¹ ✉, К.С. Арсентьева¹,
В.С. Мамутов¹, А.А. Степанов²

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

² АО «Морион», Санкт-Петербург, Россия

✉ kravtsov.dr@gmail.com

КОМБИНИРОВАННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИМЕТАЛЛА «КОВАР-МЕДЬ»

Аннотация. В статье описан опыт производства по разработке технологического процесса изготовления детали «Основание» из биметалла «Ковар-Медь» толщиной 0,18 мм. Приведены примеры дефектов, возникающих при изготовлении детали по технологическому процессу, который был аналитически рассчитан при помощи выведенных аналитических методик. Показаны необходимость компьютерного моделирования основных операций, с помощью которых изготавливается деталь «Основание», а также потребность в определении механических свойств материала заготовки. Приведены способ испытания на растяжение нестандартизированных образцов и вариации оснастки, которые могут быть использованы для получения различных механических свойств, а также дефекты испытаний, которые могут при этом возникнуть из-за относительно небольшой толщины образцов. Разработана и отлажена компьютерная модель для получения механических свойств биметалла, которые невозможно получить при экспериментальных испытаниях, а также описаны перспективы применения данной модели для определения свойств многослойных материалов, состоящих из двух и более слоев. Приведены механические свойства биметалла «Ковар-Медь», полученные из экспериментальных и компьютерных исследований.

Ключевые слова: листовая штамповка, биметалл, механические свойства, компьютерное моделирование.

Для цитирования:

Кравцов Д.Р., Арсентьева К.С., Мамутов В.С., Степанов А.А. Комбинированные испытания для определения механических свойств биметалла «Ковар-Медь» // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 114–124. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>

D.R. Kravtsov¹ ✉, X.S. Arsentyeva¹,
V.S. Mamutov¹, A.A. Stepanov²

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

² Morion, Inc., St. Petersburg, Russia

✉ kravtsov.dr@gmail.com

COMBINED TESTS FOR DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF KOVAR-COPPER BIMETAL

Abstract. The article describes the production experience in developing a technological process for manufacturing the “Header” part made of 0.18 mm thick Kovar-Copper bimetal. Examples of defects arising during the manufacture of the part according to the technological process, which was analytically calculated using the derived analytical methods, are given. The need for computer modeling of the main manufacturing operations for production of “Header” part, as well as the need for determination of mechanical properties of the blank material is shown. A method of tensile testing of non-standard samples and variants of tooling that can be used for determination of different mechanical properties are given, as well as test faults that can occur due to small thickness of samples. A computer model for determination of mechanical properties of the bimetal that cannot be obtained by experiment is developed and adjusted; the prospects for using the model for determination of properties of multilayer materials consisting of two or more layers are described. The mechanical properties of the Kovar-Copper bimetal obtained from experimental and computer studies are given.

Keywords: sheet metal forming, bimetal, mechanical properties, computer modeling.

Citation:

Kravtsov D.R., Arsentyeva X.S., Mamutov V.S., Stepanov A.A., Combined tests for determination of mechanical properties of Kovar-Copper bimetal, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 114–124, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31209>

Введение. На предприятие АО «Морион» поступило техническое задание об изготовлении детали «Основание» из биметалла «Ковар-Медь» (29НК-М1) толщиной 0,18 мм (рис. 1). Биметаллические материалы получили широкое применение в современном производстве при изготовлении как деталей, так и инструментов [1]. Зачастую использование биметаллических материалов направлено на улучшение технологических свойств изделий, а также на повышение экономической эффективности [2]. Использование биметаллического материала в данном случае обусловлено, с одной стороны, заданными требованиями к определенным механическим характеристикам (коэффициент температурного расширения), а с другой – необходимостью холодного диффузионного сваривания с ответной деталью из меди. Кроме того, сталемедный композиционный сплав обладает сочетанием высокой прочности и достаточной пластичности для осуществления операций вытяжки.

Традиционно подобного типа детали можно изготовить при помощи листовой штамповки в инструментальном штампе, в частности – способом вытяжки из ленты, с применением операций калибровки и вырубки¹. Для расчета технологического процесса производства деталей подобного типа (овальные коробочки с фланцем) существует ряд выведенных методик, связанных с определением допустимых радиусов закругления, коэффициентов вытяжки, получаемой

¹ Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Ленинград, 1979.

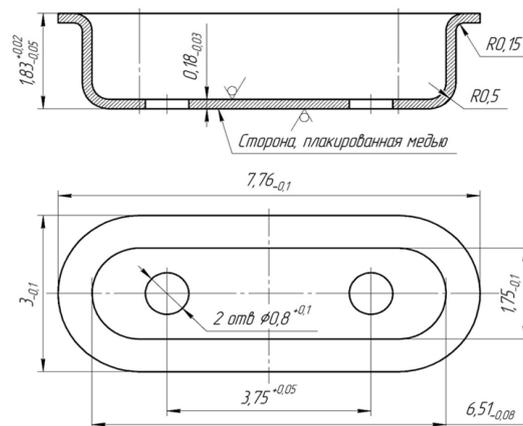


Рис. 1. Эскиз детали «Основание»
 Fig. 1. Sketch of the “Header” part

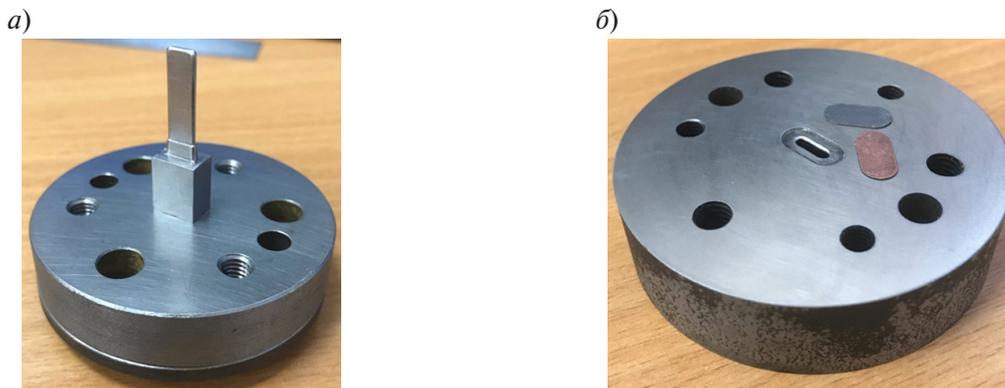


Рис. 2. Опытная оснастка для изготовления детали «Основание»: *а* – верхняя половина пакета штампа с пуансоном в сборе; *б* – нижняя половина пакета штампа с матрицей
 Fig. 2. Experimental tooling for manufacturing the “Header” part:
a – the upper die assembly with a punch; *b* – the lower die assembly with a matrix

высоты полуфабрикатов и т.д. Размеры и форма заготовки были определены при помощи дополненного метода по определению центров тяжести образующих детали [3] и оптимизированы в дальнейшем до формы эллипса.

После аналитического расчета технологии была изготовлена опытная штамповая оснастка (рис. 2) и был проведен ряд испытаний по получению требуемой детали «Основание». Однако изготовить деталь без дефектов не удалось: полуфабрикат получался либо недостаточной высоты, либо с недопустимым утонением на радиусе донного закругления, либо с нарушением сплошности материала и трещинами. В итоге попытки получить деталь привели к заклиниванию инструмента и поломке пуансона (рис. 3).

После ряда неудач при опытном изготовлении детали было принято решение отработать технологию с помощью компьютерного моделирования, которое достаточно часто применяется для данных целей в наши дни и позволяет при варьировании различных параметров определять вероятность возникновения дефектов [4–7]. Однако для создания компьютерной модели процесса требуется задание механических свойств материала, таких как модуль Юнга, предел прочности, предел текучести, коэффициент Пуассона, параметры аппроксимации кривой деформационного упрочнения и др. Среди справочной литературы большинство характеристик

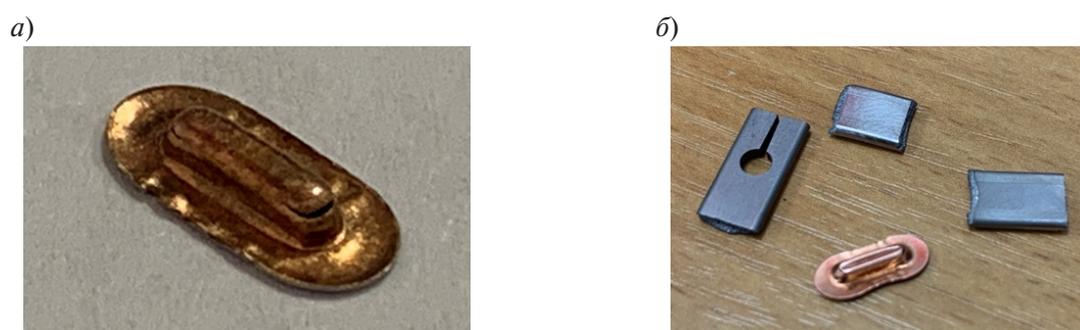


Рис. 3. Результаты изготовления детали «Основание» на опытной оснастке: *a* – деталь с разрывом на донном закруглении; *б* – деталь с трещиной на длинной стороне стенки и обломки пуансона

Fig. 3. Results of manufacturing the “Header” part using experimental tooling:

a – a part with fracture at bottom radius; *b* – a part with wall-side crack and broken punch fragments

для биметалла «Ковар-Медь» отсутствует, однако имеются сведения о составляющих композита (29НК и М1), поэтому было принято решение получить все требуемые для моделирования механические свойства путем экспериментальных испытаний и компьютерного моделирования.

Цель данной работы – описать методики и результаты испытаний и моделирования и привести механические свойства биметалла «Ковар-Медь» 29НК-М1.

Практические методы

Традиционно механические свойства листовых металлов можно получать при помощи испытаний образцов на растяжение и рассчитывать механические характеристики согласно методикам, описанным в ГОСТ 1479–84 и ГОСТ 11701–84, которые применяются для биметаллов [8, 9], а также в других схожих испытаниях [10]. Поскольку толщина испытываемого материала значительно меньше минимально допустимой толщины образца, рекомендуемой в ГОСТ 11701–84 (0,5 мм), было принято решение использовать нестандартизированные образцы, так как форма и размер образцов не оказывают влияния на показатели относительного удлинения и предела прочности материала [11, 12]. В целях экономии материала применялся образец, который был пропорционально уменьшен в два раза относительно стандартизированного образца по ГОСТ 11701–84 и был ранее испытан в экспериментальных исследованиях механических свойств меди М1 и МНЦ15-20 [13].

Испытания велись при помощи разрывной машины Tinius Olsen 5ST с применением самозатягивающегося зажимного устройства (рис. 4а) для образцов, вырезанных вдоль, поперек и под углом 45° к направлению проката для определения коэффициента анизотропии (рис. 5а, б).

Как уже отмечалось ранее в работе [13], в связи с относительно малой толщиной материала наблюдалось скольжение образцов в начале приложения нагрузки, что не позволило корректно рассчитать модуль Юнга по стандартной методике. Для получения упругого участка кривой деформационного устройства использовалась специальная крепежная оснастка (рис. 4б), которая позволяла исключить скольжение, что помогло при испытаниях, описанных в работе [13], однако при испытаниях биметалла «Ковар-Медь» в первую очередь происходила пластическая деформация крепежных участков образца, нежели упругая деформация зоны измерений (рис. 5в). Подобный эффект сохранялся при испытании образцов с толщиной 0,15, 0,2 и 0,25 мм из биметалла «Ковар-Медь», которые имелись на производстве.

В связи с этим было принято решение применить компьютерное моделирование для определения модуля Юнга биметалла.

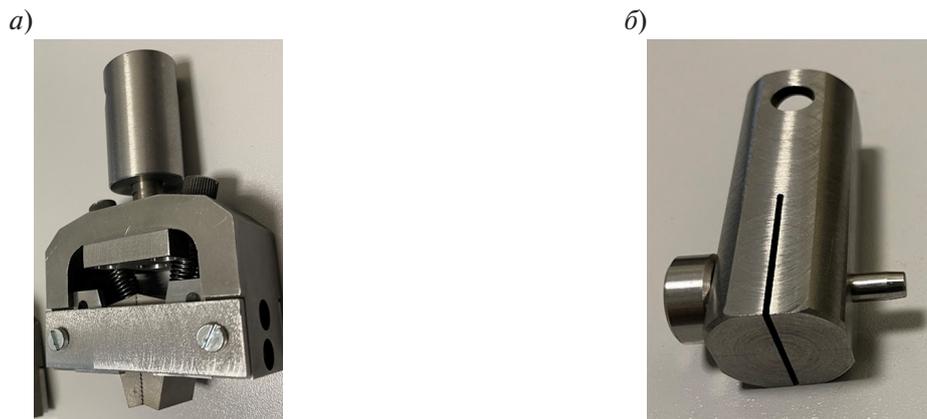


Рис. 4. Оснастка для испытаний на растяжение: *a* – зажимное устройство для испытаний на растяжения до разрыва; *б* – крепежное устройство для испытаний по определению модуля Юнга

Fig. 4. Tooling for a tensile test: *a* – the clamping device for a tensile-to-failure test; *b* – the fixture assembly for Young's modulus determination

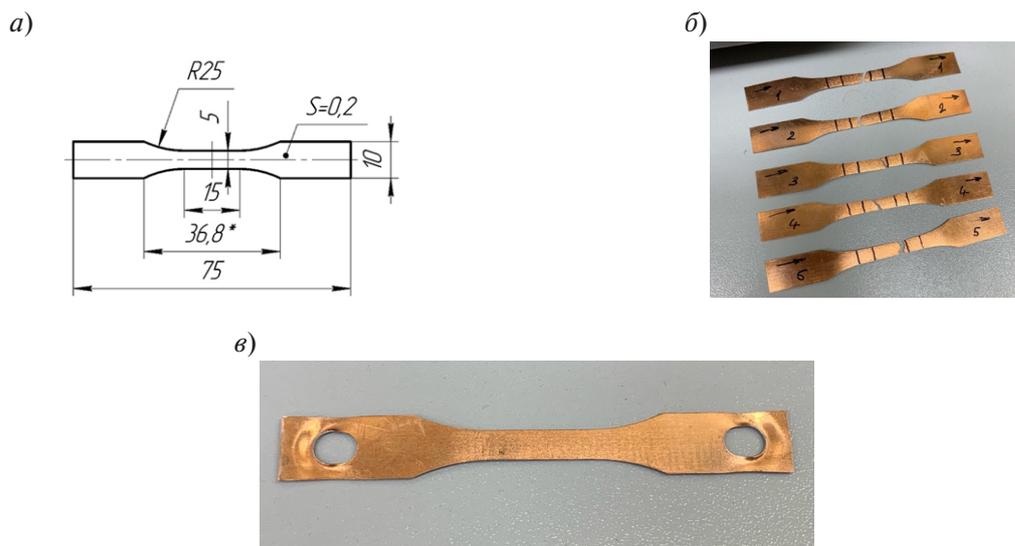


Рис. 5. Образцы из биметалла после испытаний: *a* – эскиз нестандартизированного образца для испытаний на растяжение; *б* – образцы, вырезанные вдоль проката; *в* – образец после испытаний для получения упругого участка кривой деформационного упрочнения

Fig. 5. Bimetallic samples after testing: *a* – sketch of non-standard sample for tensile test; *b* – samples cut along the rolling direction; *c* – post-test sample for determination of an elastic zone of the flow curve

Компьютерные методы

Компьютерная модель создавалась в конечно-элементном программном комплексе LS-DYNA [14], изначально разработанным для исследования высокоскоростных процессов. Однако при подборе времени счета данный комплекс позволяет считать и квазистатические процессы с минимальной погрешностью [5, 15].

В программе LS-DYNA решалась двухмерная задача. Геометрия образца задавалась двумя отдельными полосками металла длиной 1 мм и толщиной 0,06 мм для меди М1 и 0,12 мм для 29НК, которые соединялись в препроцессоре при помощи операции Boolean Glue. Для образца

механические свойства отдельных слоев (табл. 1). Выбиралась модель материала MAT_POWER_LAW_PLASTICITY. Один из концов образца жестко закреплялся, а к другому прикладывалась линейно возрастающая нагрузка, имитируя испытание на растяжение. Время счета принималось равным 0,1 с, что позволяет свести расчет в программе LS-DYNA к квазистатическому с минимальной погрешностью [15].

Таблица 1

Механические свойства, задаваемые в программу LS-DYNA

Table 1

Mechanical properties input into LS-DYNA software

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа	Параметр КДУ
29НК	8200	145	0,35	205	0,32
M1	8940	132	0,35	230	0,38

Далее созданную компьютерную модель необходимо было отладить. Основная задача отладки заключалась в следующем. Как уже было сказано ранее, в компьютерной программе считалась двухмерная задача, которая учитывала длину образца и толщину слоев. Однако для расчета модуля Юнга по ГОСТ 1497–2023 (п. 7.3) необходимо знать ширину образца для определения площади поперечного сечения. В компьютерной модели ширина образца не задавалась.

Для определения параметра ширины в первую очередь проводился калибровочный компьютерный расчет растяжения с двухслойной геометрией, но на оба слоя материала задавались характеристики одного металла. Первый расчет был проведен для двух слоев 29НК. Выбирался участок упругой деформации, где удлинение образца было прямо пропорционально увеличению нагрузки. Затем ширина образца подбиралась таким образом, чтобы расчетный модуль Юнга совпал с модулем Юнга, заданным для модели материала в программе (табл. 1). Расчет показал, что при ширине примерно 2,6 мм значения аналитического расчета и заданного параметра сходятся с погрешностью в 0,095%.

Второй аналогичный расчет (проверочный) проводился для двухслойной геометрии, где для материала обоих слоев задавались механические свойства меди M1. Ширина образца во втором расчете не подбиралась, а принималась равной 2,6 мм, как в первом случае. При этом расчетный модуль Юнга и заданный модуль Юнга при указанной виртуальной толщине образца совпали с погрешностью 0,077%.

Таким образом стала известна ширина виртуального образца, которая требуется для определения модуля Юнга биметалла. Стоит отметить, что для сходимости расчетов при определении ширины образца в калибровочном и проверочном моделировании по предлагаемой методике необходимо добиться того, чтобы характер нагружения и длительность счета были одинаковыми, а также использовать геометрическую модель с теми же размерами. В противном случае параметр ширины образца для разных материалов не совпадет, а определить модуль Юнга из расчета будет невозможно.

В третьем расчете для двухслойной геометрии задавались разные механические свойства отдельных слоев. Образец точно так же подвергался линейной нагрузке. Затем снимались характеристики удлинения в зависимости от приложенной нагрузки и выбирался участок упругой деформации, где удлинение прямо пропорционально увеличению нагрузки.

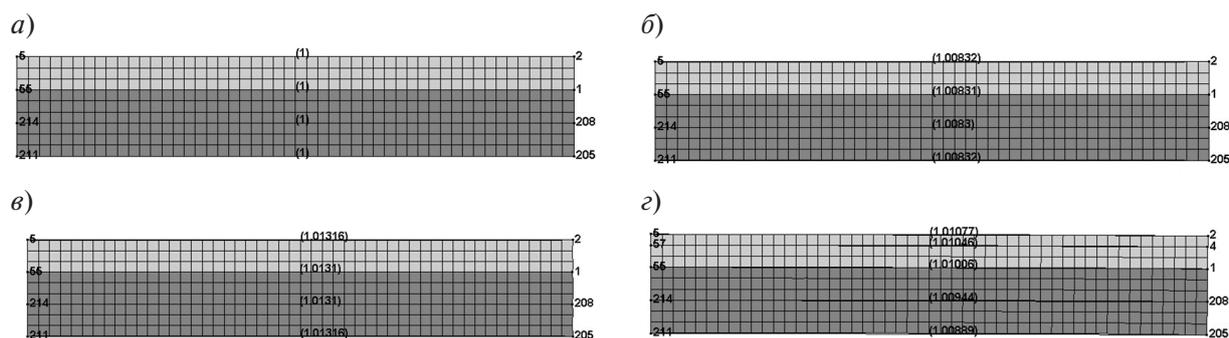


Рис. 6. Изменение геометрии двухслойных образцов в результате компьютерного моделирования до (а) и после приложения нагрузки (б–г): б – образец 29НК+29НК; в – образец М1+М1; г – образец М1+29НК

Fig. 6. Geometry evolution of bilayer samples in computational modeling before (a) and after loading (b–d): b – Kovar sample; c – copper sample; d – Kovar-Copper sample

Результаты и обсуждение

На рис. 6 представлены этапы компьютерного моделирования. На рис. 6а показан двухслойный образец до начала приложения нагрузки, а также четыре участка, с которых снимались измерения длины при отладке компьютерной модели.

На рис. 6б показан образец с заданными свойствами 29НК на обоих слоях, а на рис. 6в – образец с заданными свойствами меди М1. Поскольку на оба слоя задавались одинаковые свойства материала, то удлинение по мере приложения нагрузки в этих случаях будет идти равномерно на этапе упругой деформации.

На рис. 6г показан образец, на один слой которого задавались свойства меди М1, а на второй – 29НК. Поскольку свойства на слоях различные, то удлинение в различных плоскостях разное, а на определенном этапе моделирования, близком к началу пластической деформации, образец начал поворачиваться, отклоняясь от оси Y , вдоль которой прикладывалась нагрузка и проводились измерения. Связано это с тем, что при создании модели задавалась исключительно нагрузка, без зажимного устройства и подобной оснастки разрывной машины. При реальных испытаниях у образца нет возможности поворачиваться подобным образом.

В связи с этим удлинение измерялось в нескольких местах: на краях образца, на линии соединения и в середине каждого из слоев (рис. 6г). При расчете модуля Юнга на крайних границах образца были получены следующие значения: 130,82 ГПа для края слоя меди М1, что является заниженным значением в сравнении с номинальным модулем Юнга материала, и 150,56 ГПа для края слоя 29НК, что является завышенным значением в сравнении с номинальным значением модуля Юнга материала. Подобные значения опять-таки связаны с поворотом образца при моделировании.

Рассчитанный модуль Юнга для середины слоя меди М1 составил 132,56 ГПа (отклонение от номинального значения – 0,42%), для середины слоя 29НК – 145,08 ГПа (отклонение от номинального значения – 0,06%). На соединении слоев расчетный модуль Юнга составил 140,1 ГПа.

Далее рассчитывался средний модуль Юнга всего образца после расчетов третьего моделирования. С учетом значений на краях образца средний модуль Юнга составил 139,83 ГПа, а без учета данных значений – 139,25 ГПа.

Также общий модуль Юнга биметалла был рассчитан с учетом толщинного распределения слоев и номинальных механических свойств составляющих:

$$\frac{E_{M1} * s_{M1} + E_{29НК} * s_{29НК}}{s_{M1} + s_{29НК}} = \frac{132 * 0,06 + 145 * 0,12}{0,18} = 140,79 \text{ ГПа.}$$

Учитывая все полученные результаты, можно принять, что модуль Юнга биметалла в дальнейших технологических расчетах может быть приравнен к 140 ГПа.

По результатам экспериментальных и численных экспериментов была составлена таблица механических свойств биметалла «Ковар-Медь» (29НК-М1) (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства биметалла «Ковар-Медь»

Table 2

Mechanical properties of “Kovar-Copper” bimetal

Параметр	Обозначение	Значение
Коэффициент упрочнения – описывает форму пластического участка кривой деформационного упрочнения, МПа	B	281
Степенной показатель кривой деформационного упрочнения (показатель упрочнения) – характеризует скорость упрочнения материала и его способность к растяжению	m	0,165
Плотность материала, кг/м ³	ρ	7867
Модуль Юнга (необходим для инкрементального решателя и при анализе пружинения), ГПа	E	140
Коэффициент Пуассона (необходим для инкрементального решателя и при анализе пружинения)	μ	0,35
Предел текучести – напряжение начала пластической деформации, МПа	σ_T	300
Предел прочности, МПа	σ_B	410
Относительное удлинение, %	δ	40
Коэффициент анизотропии по Ленкфорду	R	1,1

Заключение

В статье был рассмотрен опыт предприятия АО «Морион» по подготовке технологического производства детали «Основание». Показано, что аналитические расчеты по выведенным методикам не всегда позволяют с первого раза разработать технологической процесс производства детали. Показаны возможность применения нестандартизированных образцов для испытаний на растяжение и связанные с этим проблемы – в особенности проблемы проскальзывания тонколистового образца в зажимном устройстве и пластической деформации на крепежных концах образца, которая предшествует деформации зоны испытаний.

Показана методика, которая позволяет с помощью компьютерного моделирования определять модуль Юнга композиционных материалов. Разработана компьютерная модель процесса растяжения биметаллического материала. Показанная методика отличается относительной простотой, не требует завышенной квалификации расчетчика, машинных ресурсов и затрат на время счета. С помощью приведенной методики можно определять модуль Юнга композиционного материала, состоящего из двух слоев, а в перспективе – более чем из двух слоев, без существенного повышения трудоемкости.

Приведена таблица механических свойств биметалла «Ковар-Медь» 29НК-М1. Данные свойства как могут быть применены в учебном процессе, так и использоваться на промышленных предприятиях для отладки технологических процессов производства тонколистовых деталей из данного материала при помощи компьютерного моделирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Лаврентьев А.Ю., Какорин Д.Д., Барчуков Д.А.** Высокопроизводительный способ изготовления биметаллического дискового ножа // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 100–110. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29307>
- [2] **Neulybin S.D., Belinin D.S., Terentyev S.A.** Comparative Analysis of Wear and Corrosion Attack Resistance of Bimetal Steel-Copper Products Manufactured by Plasma-Jet Hard-Facing with Direct and Reversed Polarity Current, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1401–1406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.652>
- [3] **Степанов А.А., Арсентьева К.С.** Применение метода Гюльдена-Паппуша в технологических расчетах для деталей сложной формы // Перспективные машиностроительные технологии: сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. 2023. С. 319–324.
- [4] **Арсентьева К.С., Мамутов В.С.** Учет скоростей деформации в программном комплексе LS-DYNA® при тонколистовой вытяжке // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2020. Т. 26, № 1. С. 29–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26103>
- [5] **Арсентьева К.С.** Проблема складкообразования при импульсной и квазистатической вытяжке-формовке тонколистовых деталей // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2017. Т. 23, № 1. С. 190–199. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230119>
- [6] **Bandhavi Ch., Srinath E., Reddy Guru Charan I., Althaf M., Sri Bhargava Sai V.** Modelling and validation of sheet metal forming process of brass at elevated temperatures, *Materials Today: Proceedings*, 62 (6) (2022) 3336–3343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.244>
- [7] **Pesin A., Pustovoitov D., Biryukova O., Ilyina N.** FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect, *Procedia Manufacturing*, 50 (2020) 579–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.104>
- [8] **Bong H.J., Sung J.Y., Lee J., Kim M.H., Lee K.S.** Correlating mechanical properties of Al/Al bi-metal composite and its constituents using combined experiment and microstructure-based multiscale modeling approach, *Journal of Materials Research and Technology*, 31 (2024) 2037–2051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.219>
- [9] **Belinin D.S., Neulybin S.D., Schitsyn Yu.D.** Creating Composite Materials Based on High-Nickel Alloys with the Use of a Plasma Arc at Current Reverse Polarity, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1395–1400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.651>
- [10] **Zhang H.-B., Zhang L.-J., Liu J.-Z., Ning J., Zhang J.-X., Na S.-J., Zhu L.** Microstructures and performances of the butt joint of TA1/Q235B bimetallic sheet with addition of a Mo interlayer by using narrow gap laser welding with filler wire, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (5) (2020) 10498–10510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.054>
- [11] **Abedini A., Narayanan A., Butcher C.** An investigation into the characterization of the hardening response of sheet metals using tensile and shear tests with surface strain measurement, *Forces in Mechanics*, 7 (2022) 100090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2022.100090>
- [12] **Cruz D.J., Shamchi S.P., Santos A.D., Amaral R.L., Tavares P.J.** Moreira PMGP, Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation, *Procedia Structural Integrity*, 25 (2020) 316–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.036>
- [13] **Кравцов Д.Р., Степанов А.А., Мамутов В.С., Арсентьева К.С.** Испытание нестандартизированных тонколистовых образцов на растяжение // Металлообработка. 2024. Т. 142, № 4. С. 10–19.
- [14] **Hallquist J.O.** LS-DYNA® Theory Manual. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2006. 498 p.
- [15] **Арсентьева К.С., Мамутов В.С.** Расчет процессов квазистатической формовки подвижными средами с применением комплекса LS-DYNA // Неделя науки СПбПУ, материалы научно-практической конференции с международным участием. 2014. Ч. 1. С. 114–117.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРАВЦОВ Дмитрий Романович – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: kravtsov.dr@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0915-5286>

АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна – доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: xenia.ars@xmail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4919-1325>

МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

СТЕПАНОВ Андрей Александрович – инженер-конструктор, АО «Морион», без степени.

E-mail: stndr.ltd@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4825-4741>

REFERENCES

- [1] **A.Yu. Lavrent'ev, D.D. Kakorin, D.A. Barchukov**, High-performance method of manufacturing a bi-metallic disc knife, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 100–110, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29307>
- [2] **S.D. Neulybin, D.S. Belinin, S.A. Terentyev**, Comparative Analysis of Wear and Corrosion Attack Resistance of Bimetal Steel-Copper Products Manufactured by Plasma-Jet Hard-Facing with Direct and Reversed Polarity Current, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1401–1406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.652>
- [3] **A.A. Stepanov, X.S. Arsenyeva**, Application of Gulden-Pappush method in technological calculations for complex-shaped parts, *Perspektivnye mashinostroitel'nye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Advanced mechanical engineering technologies: Proceedings of the International scientific and practical conference]*, (2023) 319–324.
- [4] **X.S. Arsenyeva, V.S. Mamutov**, Strain rate influence on thin sheet metal drawing simulation using LS-DYNA®, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 26 (01) (2020) 29–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.26103>.
- [5] **X.S. Arsenyeva**, Wrinkling issues in thin sheet metal during impulse and quasi-static metal forming, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (1) (2017) 190–199. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.230119>
- [6] **Ch. Bandhavi, E. Srinath, I. Reddy Guru Charan, M. Althaf, V. Sri Bhargava Sai**, Modelling and validation of sheet metal forming process of brass at elevated temperatures, *Materials Today: Proceedings*, 62 (6) (2022) 3336–3343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.244>
- [7] **A. Pesin, D. Pustovoitov, O. Biryukova, N. Ilyina**, FEM simulation of fabrication of Al-steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect, *Procedia Manufacturing*, 50 (2020) 579–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.104>
- [8] **H.J. Bong, J.Y. Sung, J. Lee, M.H. Kim, K.S. Lee**, Correlating mechanical properties of Al/Al bi-metal composite and its constituents using combined experiment and microstructure-based multiscale modeling approach, *Journal of Materials Research and Technology*, 31 (2024) 2037–2051. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.219>

[9] **D.S. Belinin, S.D. Neulybin, Yu.D. Schitsyn**, Creating Composite Materials Based on High-Nickel Alloys with the Use of a Plasma Arc at Current Reverse Polarity, *Procedia Engineering*, 206 (2017) 1395–1400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.651>

[10] **H.-B. Zhang, L.-J. Zhang, J.-Z. Liu, J. Ning, J.-X. Zhang, S.-J. Na, L. Zhu**, Microstructures and performances of the butt joint of TA1/Q235B bimetallic sheet with addition of a Mo interlayer by using narrow gap laser welding with filler wire, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (5) (2020) 10498–10510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.054>

[11] **A. Abedini, A. Narayanan, C. Butcher**, An investigation into the characterization of the hardening response of sheet metals using tensile and shear tests with surface strain measurement, *Forces in Mechanics*, 7 (2022) 100090. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2022.100090>

[12] **D.J. Cruz, S.P. Shamchi, A.D. Santos, R.L. Amaral, P.J. Tavares**, PMGP Moreira, Development of a mini-tensile approach for sheet metal testing using Digital Image Correlation, *Procedia Structural Integrity*, 25 (2020) 316–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.036>

[13] **D.R. Kravtsov, A.A. Stepanov, V.S. Mamutov, K.S. Arsenyeva**, Ispytanie nestandardizirovannykh tonkolistovykh obraztsov na rastiazhenie [Tensile testing of non-standardized thin sheet specimens], *Metalworking*, 4 (142) (2024) 10–19.

[14] **J.O. Hallquist**, LS-DYNA® Theory Manual. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2006. 498 p.

[15] **K.S. Arsenyeva, V.S. Mamutov**, Raschet protsessov kvazistaticheskoi formovki podvizhnymi sredami s primeneniye kompleksa LS-DYNA [Calculation of quasi-static forming processes by moving media using the LS-DYNA complex], *Nedelia nauki SPbGPU, materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [SPbSPU Science Week, materials of the scientific and practical conference with international participation]*, 1 (2014) 114–117.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Dmitry R. KRAVTSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: kravtsov.dr@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0915-5286>

Xenia S. ARSENTYEVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: xenia.ars@xmail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4919-1325>

Viacheslav S. MAMUTOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: mamutov_vs@spbstu.ru

Andrei A. STEPANOV – *Morion, Inc.*

E-mail: stndr.ltd@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4825-4741>

Поступила: 06.05.2025; Одобрена: 22.06.2025; Принята: 30.06.2025.

Submitted: 06.05.2025; Approved: 22.06.2025; Accepted: 30.06.2025.

Научная статья

УДК 620-419.8:621

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31210>



А.В. Красиков ✉, *М.В. Меркулова*, *М.В. Старицын*

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург, Россия

✉ Krasikov.av@mail.ru

СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ Ni-P-W

Аннотация. Проведено исследование электроосаждения покрытий системы Ni-P-W из пирофосфатного и цитратного электролитов. Показано, что для активного включения вольфрама в покрытие целесообразно использовать цитратный электролит с температурой 70°C, что позволяет получать покрытия, содержащие 11,5% P и 5% W без микротрещин. Термообработка покрытия данного химического состава при 350°C приводит к увеличению микротвердости до значения 10,1 ГПа, что соответствует твердому хромированию. При этом происходит образование нанокристаллической структуры, состоящей из фаз Ni₃P и Ni₅P₂, и твердого раствора на основе никеля. За счет взаимной диффузии основного металла и покрытия при отжиге повышается адгезия покрытия как на углеродистых, так и на нержавеющей сталях. Экспозиция стальных образцов с покрытием Ni-P-W в 3,5% NaCl показала, что покрытие обладает высокой коррозионной стойкостью. В целом уровень свойств покрытия Ni-P-W соответствует твердому гальваническому хрому, но не имеет микротрещин.

Ключевые слова: гальванические покрытия, покрытие Ni-P-W, термообработка покрытий, цитратный электролит, эксплуатационные свойства.

Для цитирования:

Красиков А.В., Меркулова М.В., Старицын М.В. Свойства и технологические особенности электроосаждения покрытий Ni-P-W // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 125–135.
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31210>



A.V. Krasikov ✉, M.V. Merkulova, M.V. Staritsyn

NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”,
St. Petersburg, Russia

✉ Krasikov.av@mail.ru

PROPERTIES OF NI-P-W COATINGS AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF THEIR ELECTRODEPOSITION

Abstract. A study of the electrodeposition of Ni-P-W coatings from pyrophosphate and citrate electrolytes was conducted. It was shown that for active inclusion of tungsten in the coating, it is advisable to use a citrate electrolyte with a temperature of 70°C, which allows obtaining coatings containing 11.5% P and 5% W without microcracks. Heat treatment of the coating of this chemical composition at 350°C leads to an increase in microhardness to a value of 10.1 GPa, which corresponds to hard chromium plating. In this case, a nanocrystalline structure is formed, consisting of the Ni₃P and Ni₅P₂ phases, and a nickel-based solid solution. Due to the mutual diffusion of the base metal and the coating during annealing, the adhesion of the coating increases on both carbon and stainless steels. Exposure of steel samples with a Ni-P-W coating to 3.5% NaCl showed that the coating has high corrosion resistance. In general, the level of properties of the Ni-P-W coating corresponds to hard galvanic chromium, but does not have microcracks.

Keywords: galvanic coatings, Ni-P-W coating, heat treatment of coatings, citrate electrolyte, performance properties.

Citation:

Krasikov A.V., Merkulova M.V., Staritsyn M.V., Properties of Ni-P-W coatings and technological features of their electrodeposition, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 125–135, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31210>

Введение. Одним из направлений развития гальванических покрытий является разработка альтернативы шестивалентному хромированию. Ключевой проблемой является достижение высокой микротвердости, характерной для покрытий типа «хром твердый», достигающей 10 ГПа (ОСТ5 Р.9048) при обеспечении коррозионной стойкости «молочного» хрома. Альтернативой хромовым покрытиям может служить покрытие на основе системы Ni-P, однако высококачественные покрытия никель-фосфор получают дорогостоящим методом химического осаждения, скорость роста покрытий при этом мала, и электролит фактически является одноразовым.

Более технологичным и экономически целесообразным является электрохимический метод нанесения покрытий Ni-P, однако беспористые покрытия содержат не более 10–11 масс. % P [1]. Такие покрытия имеют невысокую микротвердость, и даже после термообработки, которая приводит к кристаллизации соединений Ni₃P, этот параметр не превышает 7,7 ГПа [2]. Это значение не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к твердым хромовым покрытиям. Для улучшения покрытий Ni-P целесообразно применять легирование их вольфрамом [2], что существенно улучшает их микротвердость за счет твердорастворного упрочнения.

В настоящее время система Ni-P-W рассматривается как база для построения композиционных [3, 4] и многослойных покрытий [5, 6]. Перспективными для получения тройных покрытий Ni-P-W являются пирофосфатный и цитратный электролиты. Первый тип обладает высокой рассеивающей способностью [7], второй способствует высокому уровню содержания вольфрама в покрытиях [8, 9]. Тем не менее, как показано в [10], осаждение тройных покрытий Ni-P-W имеет свои особенности, связанные с ингибированием восстановления вольфрама атомами

фосфора, и для разработки технологии получения Ni-P-W покрытий необходимо исследование влияния технологических параметров на их состав и свойства.

Целью работы было исследование процесса получения покрытий Ni-P-W из пирофосфатного и цитратного электролитов и обеспечение микротвердости не ниже 10 ГПа.

Методика эксперимента

Для эксперимента использовали пирофосфатный и цитратный электролиты. Состав пирофосфатного электролита выбран на основе предложенного ранее состава для электроосаждения покрытий бинарного сплава Ni-W, в который на основании результатов исследований электроосаждения сплава Ni-P [1] введено 0,10 моль/л NaH_2PO_2 . Состав электролита приведен в табл. 1. Покрытие наносили при pH 9,5, оптимальном для электроосаждения сплавов Ni-W из пирофосфатного электролита [11], и температуре 50°C. При осаждении бинарного сплава в данных условиях формируются покрытия, содержащие 28–30% W. Цитратный электролит содержал сульфат никеля 0,06 моль/л, цитрат натрия – 0,5 моль/л и гипофосфит натрия – 0,05 моль/л, pH – 8,0.

Таблица 1

Состав электролита для осаждения сплава Ni-P-W

Table 1

Composition of electrolyte for Ni-P-W alloy deposition

Компонент	Концентрации компонентов, моль/л	
	Пирофосфатный электролит	Цитратный электролит
NiSO_4	0,20	0,06
$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	–	0,360–0,535
$\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$	0,60	–
Na_2WO_4	0,20	0–0,175
NH_4Cl	–	0,50
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,15	–
NaH_2PO_2	0,05–0,10	0,05
pH	9,5	8,0

Массовую долю фосфора определяли с помощью рентгеноспектрального микроанализа, реализованного на базе растрового электронного микроскопа Tescan Vega II. Исследования фазового состава проводили на бедных образцах с исследуемым покрытием с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV. Измерения проводили с шагом угла 2θ 0,05° при времени выдержки 2 с. Обработку дифракционных линий проводили с помощью программного обеспечения Eva Evolution. Микротвердость покрытий определяли по Виккерсу с помощью микротвердомера ПМТ-3 по ГОСТ 9450. Контроль пористости покрытий проводили по ГОСТ 9.302 методом наложения фильтровальной бумаги. Коррозионные испытания проводили методом погружения образцов покрытий в раствор 3,5% NaCl с периодической фиксацией массы образцов.

Результаты и обсуждение

Первые эксперименты по осаждению покрытий Ni-P-W проводили в пирофосфатном электролите, выбранном на основе электролита для получения покрытия Ni-30 масс. % W. По сравнению с электроосаждением сплава никель-вольфрам при осаждении сплава тройной системы

введение 0,10 моль/л гипофосфита натрия приводит к резкому снижению содержания вольфрама в покрытии (рис. 1). При уменьшении концентрации NaH_2PO_2 вдвое содержание вольфрама увеличивается незначительно, и, несмотря на явное преобладание концентрации вольфрамата над гипофосфитом, происходит преимущественное восстановление фосфора. Такое поведение объясняется конкурирующей адсорбцией электроактивных фосфор- и вольфрамсодержащих частиц.

Селективность никеля по отношению к восстановлению фосфора и подавление реакции восстановления вольфрамата в присутствии гипофосфита в электролите объяснены с позиций механизма восстановления вольфрама, опубликованного в [12]. В предложенной гипотезе вольфрамат может восстанавливаться не на любом участке поверхности электрода, а на свежесформированных частицах (кластерах) никеля или сплава. Соответственно, если таковые частицы ингибированы продуктом восстановления гипофосфит-ионов, восстановление вольфрама существенно затруднено, и, как результат, его содержание в покрытии значительно ниже, чем могло бы быть в отсутствие гипофосфит-ионов.

Известно, что повысить содержание вольфрама в бинарной системе Ni-W возможно за счет увеличения рабочей температуры электролита до 60–75°C [8, 13, 14]. Однако такое повышение температуры приведет к гидролизу дифосфата, в результате чего электролит выйдет из строя. Это делает невозможным решить задачу по обогащению тройного сплава вольфрамом в пиродифосфатном электролите. Поэтому дальнейшие работы проводились с электролитом на основе цитратных комплексов никеля и вольфрама.

В литературе часто отмечается эффективность использования электролита Ni-W, разработанного командой Т. Ямасаки [13, 14] в качестве базы для получения тройных сплавов Ni-P-W. В текущем эксперименте электролит содержал сульфат никеля 0,06 моль/л, цитрат натрия – 0,360–0,535 моль/л и гипофосфит натрия – 0,05 моль/л, pH – 8,0. Для определения концентрации вольфрама, при которой фосфор перестанет подавлять его восстановление, было оценено влияние концентрации вольфрамата натрия в электролите на содержание вольфрама в покрытии. Одновременно с увеличением концентрации ионов вольфрама повышали концентрацию цитрат-ионов. При pH 8,0 один ион вольфрама связывается в комплекс с одним цитрат-ионом [15], поэтому концентрация цитрата, не связанного с никелем или вольфрамом, оставалась постоянной для всей серии опытов.

Введение вольфрамата натрия при комнатной температуре практически не дает эффекта: вольфрам в покрытие включается лишь в незначительном количестве (рис. 2). Повышение температуры до 50°C, вопреки ожиданиям, не позволило осадить покрытия с заметным содержанием вольфрама. Его количество в сплаве, независимо от концентрации вольфрамата в электролите, не превышало 1 масс. %, что даже ниже, чем при осаждении из пиродифосфатного электролита. Опираясь на вывод, сделанный в предыдущем разделе, температуру электролита довели до 70°C. Действительно, при 70°C удалось получить сплав с 5 масс. % тугоплавкого компонента. По характеру кривых на рис. 2 можно косвенно судить, что при температуре 70°C фосфор уже не так активно подавляет восстановление вольфрама. Содержание вольфрама в сплаве хоть и становится более чувствительным к концентрации вольфрамата, но все же выходит на насыщение, и его содержание намного ниже 45 масс. %, которое получено в [14] при осаждении из такого же по составу электролита без гипофосфита. Это говорит о том, что хоть температура и ускоряет восстановление вольфрама в данной системе, но все же фосфор продолжает ингибировать этот процесс.

С увеличением плотности тока содержание фосфора сначала снижается, но после достижения 5 А/дм² стабилизируется и далее не изменяется (рис. 3а). Повышение температуры электролита хотя и значительно повысило содержания вольфрама (рис. 3б), лишь немного снизило содержание фосфора.

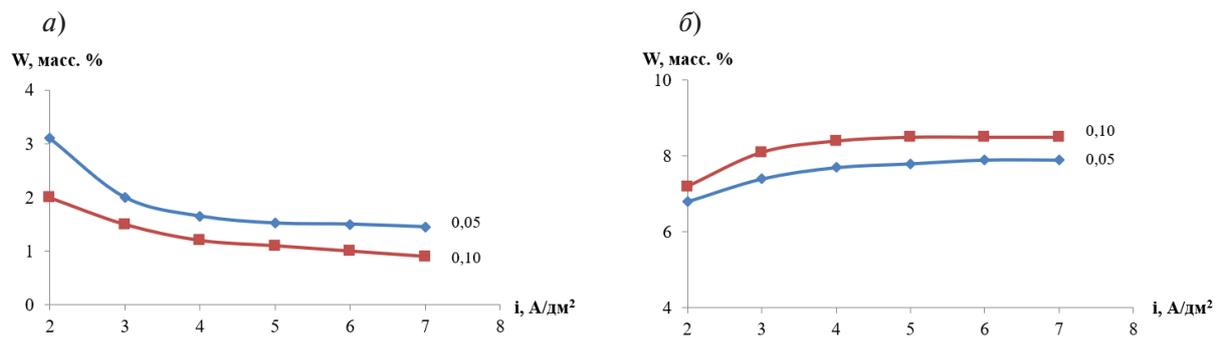


Рис. 1. Зависимость содержания вольфрама (а) и фосфора (б) в покрытии Ni-P-W от плотности тока для электролитов с концентрацией гипофосфита натрия, моль/л

Fig. 1. Dependence of the content of tungsten (a) and phosphorus (b) in the Ni-P-W coating on the current density for electrolytes with a concentration of sodium hypophosphite, mol/l

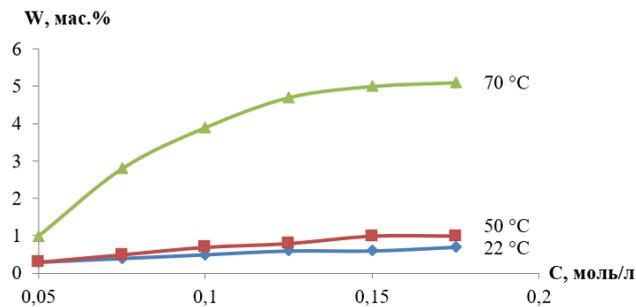


Рис. 2. Влияние концентрации вольфрамата натрия в электролите на содержание вольфрама в сплаве Ni-P-W при плотности тока 5 А/дм² и различных температурах

Fig. 2. Effect of sodium tungstate concentration in the electrolyte on the tungsten content in the Ni-P-W alloy at a current density of 5 A/dm² and different temperatures

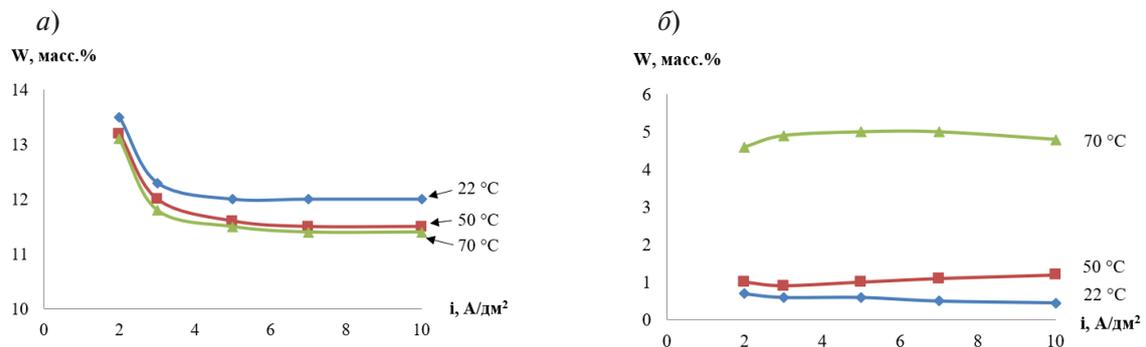


Рис. 3. Влияние плотности тока и температуры электролита на химический состав покрытия: содержание фосфора (а); содержание вольфрама (б)

Fig. 3. Effect of current density and electrolyte temperature on the chemical composition of the coating: phosphorus content (a); tungsten content (b)

Эффективное включение вольфрама в покрытие осуществляется только при 70°C , и скорость восстановления вольфрамата зависит преимущественно от его концентрации (рис. 2) и температуры, что косвенно говорит о возможности наложении химического восстановления никеля и вольфрама.

Слабая зависимость содержания вольфрама от плотности тока в цитратном электролите объясняется ингибированием восстановления вольфрама продуктами восстановления фосфора (атомарный фосфор). Существенная разница по содержанию фосфора в сплавах, осажденных при комнатной температуре и 50°C , говорит об ослаблении адсорбции продуктов восстановления гипофосфита, которое, тем не менее, не приводит к значительным изменениям в содержании вольфрама. То есть помимо конкурирующей адсорбции на восстановление вольфрама действует еще ряд параметров. Наиболее весомым представляется изменение энергии активации процесса восстановления вольфрамат-иона, в особенности с учетом того, что при восстановлении сплава Ni-W из цитратного электролита температура оказывает значительное влияние на состав сплава [8].

Существует мнение, что электрохимически осажденные покрытия на основе системы Ni-P имеют несплошности в виде пор и микротрещин. Однако детальное исследование структуры поверхности покрытий, испытание на пористость по ГОСТ 9.302 методом наложения фильтровальной бумаги опровергают это мнение. Разработанные покрытия Ni-P-W осаждаются сплошные, не имеют пор или трещин (рис. 4).

Исходя из полученных зависимостей оптимальным режимом нанесения покрытия являются диапазон плотностей тока $4-7 \text{ А/дм}^2$ и температура электролита 70°C . При этих условиях осаждается покрытие, содержащее 11,5% P и 5% W. Неизменность химического состава, в широком интервале плотности тока, позволяет использовать данный электролит и режим нанесения покрытия на изделия сложной геометрии. Данные технологические условия были использованы для изготовления образцов для исследования процессов формирования композиционного покрытия.

После термообработки в течение одного часа при 350°C пресыщенный твердый раствор разлагается с образованием наноразмерной фазы Ni_3P , твердого раствора на основе никеля, содержащего фосфор и, предположительно, вольфрам, а также третью фазу, которая представлена лишь одним независимым максимумом (рис. 5). Рассчитанный средний размер ОКР для каждой из имеющихся фаз равен примерно 22 нм. Третья фаза, вероятно, является соединением Ni_5P_2 , которое, впрочем, неравновесно при данной концентрации фосфора в покрытии. Термодинамически оно должно образовываться при $\sim 25 \text{ ат. } \%$, что позволяет сделать вывод о наличии флуктуаций химического состава в объеме покрытия. Также характер дифрактограммы позволяет предположить наличие некоторого количества аморфной фазы.

Изначально микротвердость покрытия составляет 6,1 ГПа. После часовой термообработки при 350°C она значительно возрастает, превышая значение микротвердости, полученной в системе Ni-P при тех же условиях (7,7 ГПа), и составляет 8,8 ГПа. Термообработка в течение 2 ч при той же температуре повышает микротвердость покрытия до 10,1 ГПа, что соответствует уровню микротвердости твердых хромовых покрытий.

В процессе термической обработки помимо кристаллизации фосфидов никеля происходит диффузия компонентов основного металла в покрытие и наоборот. На рис. 6 приведены результаты исследования химического состава покрытия Ni-P-W и стального образца после отжига при 350°C в течение 6 ч. Точечные участки сбора информации об элементном составе обозначены перекрестиями в левых верхних углах подписей спектров 1–6 и в правых верхних углах подписей спектров 7–8. Зона эмиссии характеристического рентгеновского излучения каждого точечного участка зависит от материала аналитической поверхности и имеет диаметр не менее 1 мкм. Все точечные участки лежат на одной прямой, пересекающей покрытие и расположенной таким образом, чтобы точечные зоны анализа не перекрывались друг другом.

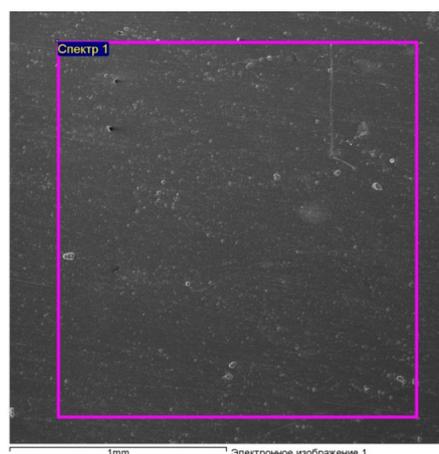


Рис. 4. Электронное изображение поверхности покрытия Ni-P-W. Прямоугольной рамкой выделен участок сбора информации об элементном составе покрытия

Fig. 4. Electronic image of the Ni-P-W coating surface. The rectangular frame highlights the area where information about the elemental composition of the coating is collected

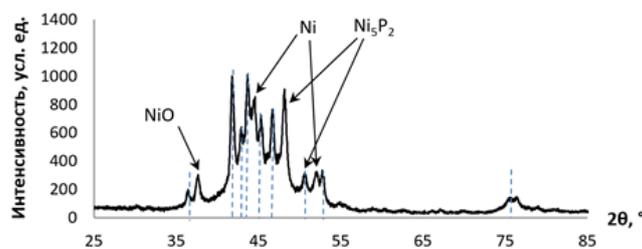


Рис. 5. Рентгенограмма образца Ni-P-W, термообработанного в течение 2 ч при температуре 350°C. Штрих-пунктиром обозначена фаза N_3P

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of a Ni-P-W sample heat-treated for 2 h at 350°C. N_3P phase is indicated by the dashed line

Измерение элементного состава покрытия по толщине в равноудаленных точках (рис. 6а) показывает, что содержание фосфора, вольфрама и никеля практически постоянно по толщине покрытия, но вблизи границы раздела появляется железо (рис. 6б). При этом расстояние точки, в которой обнаружено железо, до границы раздела двукратно превышает диаметр точечного участка анализа. Это свидетельствует о том, что железо присутствует также и в приграничных слоях покрытия. То есть за 6 ч термообработки произошла диффузия железа в покрытие. Благодаря малой глубине проникновения эта примесь железа не ухудшает эксплуатационных свойств материала, но обеспечивает высокую прочность сцепления покрытий с основным металлом (табл. 2).

Прочность сцепления покрытий проверяли на образцах из Ст20 и холоднокатаной стали 08X18Н10Т методом нанесения сетки царапин по ГОСТ 9.302. Из представленных в таблице результатов следует, что без термической обработки покрытия не удовлетворяют требованиям ГОСТ, после термической обработки в течение 1 ч адгезия к нержавеющей стали 08X18Н10Т остается недостаточной, но после 2 ч отжига прочность сцепления удовлетворительная.

Полученное покрытие, осажденное на Ст20 и термообработанное в течение 2 ч, было подвергнуто экспозиции в 3,5% растворе NaCl. Кривая изменения массы образца во времени

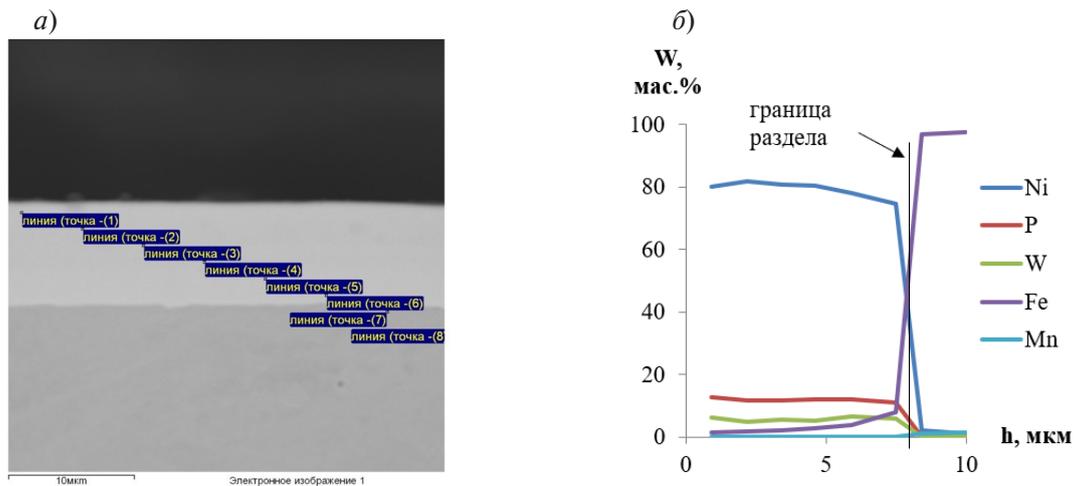


Рис. 6. Расположение точек сканирования химического состава покрытия Ni-P-W после термообработки (а) и профиль элементного состава по толщине покрытия (б)

Fig. 6. Location of scanning points of the chemical composition of the Ni-P-W coating after heat treatment (a) and the profile of the elemental composition across the coating thickness (b)

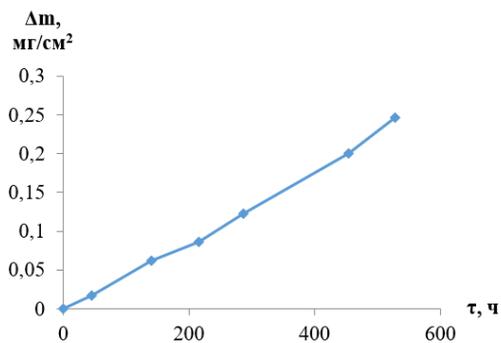


Рис. 7. Изменение массы образца с покрытием во времени экспозиции в 3,5% NaCl

Fig. 7. Change in the mass of the coated sample over the exposure time in 3.5% NaCl

Таблица 2

Влияние длительности термообработки при 350°C на прочность сцепления покрытия Ni-P-W с углеродистой и аустенитной сталью

Table 2

Effect of heat treatment duration at 350°C on the adhesion strength of Ni-P-W coating to carbon and austenitic steel

Продолжительность отжига, ч	0	1	2	3	4	5	6
Ст20	—	+	+	+	+	+	+
08X18H10T	—	—	+	+	+	+	+

практически линейна (рис. 7). За время выдержки 528 ч масса образцов изменилась лишь на 0,25 мг/(см²·ч), что говорит о высокой коррозионной стойкости покрытия.

Таким образом, по совокупности свойств покрытия Ni-P-W, полученные из цитратного электролита и подвергнутые термообработке 350°C в течение 2 ч, отвечают требованиям, предъявляемым к твердому хромовым покрытиям, не имея при этом существенного недостатка последних – микротрещин – и обеспечивают противокоррозионную защиту.

Заключение

При нанесении электрохимических покрытий Ni-P-W ярко выражен эффект ингибирования восстановления вольфрама фосфором, и оба легирующих элемента восстанавливаются в условиях конкурирующей адсорбции. Для увеличения скорости восстановления вольфрама и снижения адсорбции фосфора необходимо осаждать покрытие Ni-P-W при высокой температуре электролита. Поскольку температура работы пиродифосфатных электролитов ограничена из-за гидролиза комплексобразователя, для осаждения покрытий Ni-P-W целесообразно использовать цитратный электролит.

Повышение температуры цитратного электролита до 70°C обеспечило включение вольфрама в покрытие в количестве 5,0% при 11,5% фосфора, что согласуется с предположением о конкурирующей адсорбции. Определены условия осаждения покрытия Ni-P-W, содержащего 11,5% P и 5% W, которое после термообработки приобретает микротвердость твердого хромирования и не имеет пор. Термическая обработка покрытия Ni-P-W в течение 2 ч позволяет достичь высокой адгезии покрытия как к углеродистым, так и к нержавеющей сталям, что обусловлено диффузией железа в покрытие. Термически обработанные покрытия Ni-P-W обладают высокой коррозионной стойкостью в 3,5% растворе NaCl.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Красиков А.В.** Влияние концентрации гиподифосфита натрия в пиродифосфатном электролите на состав и свойства электроосажденных покрытий Ni-P // Вопросы материаловедения. 2017. Т. 89, № 1. С. 123–129. DOI: 10.22349/1994-6716-2017-89-1-123-129
- [2] **Krasikov A.V.** Synthesis of nanocomposite coatings based on electrodeposited amorphous Ni-P-W layers, *Inorganic Materials: Applied Research*, 11(6) (2020) 1359–1363. DOI: 10.1134/S207511332006012X
- [3] **Sagedhi S., Ebrahimifar H.** The effect of electroplating current density on microstructure, corrosion, and wear behavior of Ni-P-W-TiO₂ coating, *International Journal of Materials Research*, 112(6) (2021) 474–485. DOI: 10.1515/ijmr-2020-7872
- [4] **Kousar H., Umer M.A., Shehzad K., Ferdous R., Mehmood K., Basit A., Shahbaz T., Yasir M., Shaikoor A.** Exceptional mechanical properties and wear behavior of Al₂O₃ nanoparticle reinforced Ni-W-P coatings, *Tribology International*, 194 (2024) 109533. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109533
- [5] **Biswas P., Das S.K., Sahoo P.** Tribological and corrosion performance of duplex electrodeposited Ni-P/Ni-W-P coatings, *Physica Scripta*, 99(11) (2024) 115018. DOI: 10.1088/1402-4896/ad826e
- [6] **Ahmed S.Y., Mahmoud S.B., Shoeib M.A.** Synthesis, structure characterization, and corrosion properties of duplex electroless Ni-P/Ni-B and Ni-P/Ni-B-W coatings on mild steel, *Scientific Reports*, 14 (2024) 24983. DOI: 10.1038/s41598-024-75883-3
- [7] **Li Q., Hu J., Zhang J., Yang P., Hu Y., An M.** Screening of electroplating additive for improving throwing power of copper pyrophosphate bath via molecular dynamics simulation, *Chemical Physics Letters*, 757 (2020) 137848. DOI: 10.1016/j.cplett.2020.137848
- [8] **Krasikov A.V., Merkulova M.V., Markov M.A., Bykova A.D.** Tungsten-rich Ni-W coatings, electrodeposited from concentrated electrolyte for complex geometry parts protection, *Journal of Physics: Conference Series*, 1758 (2021) 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012019
- [9] **Pereira da Silva C.R., Dantas Costa J., Filgueira de Almeida A., Costa de Santana R.A., Nascimento Campos A.R., Nicácio Alves J.J., de Abreu Santos T.F.** Chemical composition variation of the Ni-W alloy as a

function of parameters used in the electrodeposition process, *Journal of Applied Electrochemistry*, 54 (2024) 611–623. DOI: 10.1007/s10800-023-01992-y

[10] **Ahmad J., Asami K., Takeuchi A., Inoue A.** Effect of sodium hypophosphite on the structure and properties of electrodeposited Ni–W–P alloys, *Materials Transactions*, 44(4) (2003) 705–708. DOI: 10.2320/materialtrans.44.705

[11] **Красиков А.В.** Электроосаждение сплава никель-вольфрам из пиррофосфатного электролита. Автореферат дисс. ... канд. хим. наук. СПб., 2012. 20 с.

[12] **Красиков А.В., Красиков В.Л.** Механизм электроосаждения сплава никель-вольфрам из пиррофосфатного электролита // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2016. Т. 62, № 36. С. 12–23. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.36.12

[13] **Yamasaki T.** High-strength nanocrystalline Ni-W alloys produced by electrodeposition, *Materials Physics and Mechanics*, 1(2) (2000) 127–132.

[14] **Schloßmacher P., Yamasaki T.** Structural analysis of electroplated amorphous-nanocrystalline Ni-W, *Mikrochimica Acta*, 132 (2000) 309–313. DOI: 10.1007/s006040050074

[15] **Cruywagen J.J., Krüger L., Rohwer E.A.** Complexation of tungsten (VI) with citrate, *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 7 (1991) 1727–1731. DOI: 10.1039/DT9910001727

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КРАСИКОВ Алексей Владимирович – начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», канд. хим. наук.

E-mail: Krasikov.av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1625-2347>

МЕРКУЛОВА Мария Витальевна – инженер 3-й категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», без степени.

E-mail: merkulovmars@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1772-3103>

СТАРИЦЫН Михаил Владимирович – инженер 2-й категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», канд. физ.-мат. наук.

E-mail: ms_145@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0088-4577>

REFERENCES

[1] **A.V. Krasikov**, Effect of sodium hypophosphite concentration in pyrophosphate electrolyte on the composition and properties of electrodeposited Ni-P coatings, *Voprosy Materialovedeniya*, 1(89) (2017) 123–129. DOI: 10.22349/1994-6716-2017-89-1-123-129

[2] **A.V. Krasikov**, Synthesis of nanocomposite coatings based on electrodeposited amorphous Ni–P–W layers, *Inorganic Materials: Applied Research*, 11(6) (2020) 1359–1363. DOI: 10.1134/S207511332006012X

[3] **S. Sagedhi, H. Ebrahimifar**, The effect of electroplating current density on microstructure, corrosion, and wear behavior of Ni–P–W–TiO₂ coating, *International Journal of Materials Research*, 112(6) (2021) 474–485. DOI: 10.1515/ijmr-2020-7872

[4] **H. Kousar, M.A. Umer, K. Shehzad, R. Ferdous, K. Mehmood, A. Basit, T. Shahbaz, M. Yasir, A. Shaikoor**, Exceptional mechanical properties and wear behavior of Al₂O₃ nanoparticle reinforced Ni-W-P coatings, *Tribology International*, 194 (2024) 109533. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109533

- [5] **P. Biswas, S.K. Das, P. Sahoo**, Tribological and corrosion performance of duplex electrodeposited Ni-P/Ni-W-P coatings, *Physica Scripta*, 99(11) (2024) 115018. DOI: 10.1088/1402-4896/ad826e
- [6] **S.Y. Ahmed, S.B. Mahmoud, M.A. Shoeib**, Synthesis, structure characterization, and corrosion properties of duplex electroless Ni-P/Ni-B and Ni-P/Ni-B-W coatings on mild steel, *Scientific Reports*, 14 (2024) 24983. DOI: 10.1038/s41598-024-75883-3
- [7] **Q. Li, J. Hu, J. Zhang, P. Yang, Y. Hu, M. An**, Screening of electroplating additive for improving throwing power of copper pyrophosphate bath via molecular dynamics simulation, *Chemical Physics Letters*, 757 (2020) 137848. DOI: 10.1016/j.cplett.2020.137848
- [8] **A.V. Krasikov, M.V. Merkulova, M.A. Markov, A.D. Bykova**, Tungsten-rich Ni-W coatings, electrodeposited from concentrated electrolyte for complex geometry parts protection, *Journal of Physics: Conference Series*, 1758 (2021) 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012019
- [9] **C.R. Pereira da Silva, J. Dantas Costa, A. Filgueira de Almeida, R.A. Costa de Santana, A.R. Nascimento Campos, J.J. Nicácio Alves, T.F. de Abreu Santos**, Chemical composition variation of the Ni–W alloy as a function of parameters used in the electrodeposition process, *Journal of Applied Electrochemistry*, 54 (2024) 611–623. DOI: 10.1007/s10800-023-01992-y
- [10] **J. Ahmad, K. Asami, A. Takeuchi, A. Inoue**, Effect of sodium hypophosphite on the structure and properties of electrodeposited Ni–W–P alloys, *Materials Transactions*, 44(4) (2003) 705–708. DOI: 10.2320/matertrans.44.705
- [11] **A.V. Krasikov**, Elektroosazhdenie splava nikel'-vol'fram iz pirofosfatnogo elektrolita. Diss. kand. khim. nauk [Electrodeposition of nickel-tungsten alloy from pyrophosphate electrolyte. Cand. chem. sci. diss.]. St. Petersburg., 2012.
- [12] **A.V. Krasikov, V.L. Krasikov**, Mechanism of Nickel-Tungsten alloy electrodeposition from pyrophosphate electrolyte, *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 36(62) (2016) 12–23. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.36.12
- [13] **T. Yamasaki**, High-strength nanocrystalline Ni-W alloys produced by electrodeposition, *Materials Physics and Mechanics*, 1(2) (2000) 127–132.
- [14] **P. Schloßmacher, T. Yamasaki**, Structural analysis of electroplated amorphous-nanocrystalline Ni-W, *Mikrochimica Acta*, 132 (2000) 309–313. DOI: 10.1007/s006040050074
- [15] **J.J. Cruywagen, L. Krüger, E.A. Rohwer**, Complexation of tungsten (VI) with citrate, *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 7 (1991) 1727–1731. DOI: 10.1039/DT9910001727

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksey V. KRASIKOV – NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

E-mail: Krasikov.av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1625-2347>

Maria V. MERKULOVA – NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

E-mail: merkulovmars@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1772-3103>

Mikhail V. STARITSYN – NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

E-mail: ms_145@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0088-4577>

Поступила: 20.05.2025; Одобрена: 22.06.2025; Принята: 24.06.2025.

Submitted: 20.05.2025; Approved: 22.06.2025; Accepted: 24.06.2025.

Лучшие практики Best practices

А.И. Могучев, Р.Ф. Карачурина, Э.В. Габидуллина

ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ И ОСВОЕНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ, ВОСТРЕБОВАННЫХ РЫНКОМ: ОПЫТ УГНТУ

Аннотация. Кадровый потенциал компании и его подготовка – важная задача, к реализации которой подключаются не только предприятия, но и высшие учебные заведения. Опыт ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», описанный в этой статье, показывает эффективные схемы взаимодействия сферы экономики и системы высшего образования на поприще подготовки квалифицированных, востребованных и конкурентоспособных кадров, инструменты сокращения периода адаптации и быстрого входа в производственные процессы новых сотрудников, а также способы освоения уникального набора компетенций для выпускников университета. В вузе реализуются программы обучения корпоративных групп, с возможностью параллельного трудоустройства, освоения дополнительных квалификаций через мини-профили и рабочих профессий, что является актуальным в современных условиях.

A.I. Moguchev, R.F. Karachurina, E.V. Gabidullina

Ufa State Petroleum Technological University (USPTU),
Ufa, Russia

DEVELOPING MARKET-RELEVANT COMPETENCIES: USPTU CASE STUDY

Abstract. Developing company's workforce potential is an important task, and the article examines the critical role of higher education institutions (besides enterprises) in building competitive workforce potential. The experience of the Ufa State Petroleum Technological University (USPTU), described in this article, shows effective models of interaction between the economic sphere and the higher education system in the field of training qualified, in-demand and competitive personnel, tools for reducing the adaptation period and quick entry into production processes, as well as ways to master a unique set of competencies by graduates. The university implements training programs for corporate groups with the possibility of parallel employment, as well as developing additional competencies through mini-profiles and mastering blue-collar jobs, which is relevant in modern conditions.

Формирование команды, отвечающей современным требованиям, владеющей всеми актуальными компетенциями – является одной из самых главных и первоочередных задач любой организации. Решить эту задачу возможно не только поиском подходящих кадров, но и их подготовкой. В сложившихся условиях часто эту функцию выполняют корпоративные университеты, которые сегодня имеются практически во всех крупных корпорациях и охватывают весь их

персонал. Как показало исследование, проведенное НУИ ВШЭ среди приоритетных направлений, на которые ориентированы программы, предлагаемые корпоративными университетами, в целом отражают ориентацию на развитие корпораций, среди них можно выделить:

- развитие продуктов, сервисов и процессов;
- развитие системы L&D;
- цифровая трансформация и цифровизация процессов;
- инициация стратегических проектов компании;
- привлечение и подбор персонала;
- развитие управленческого / лидерского стиля [1].

На систему высшего образования в Российской Федерации последним поколением федеральных государственных образовательных стандартов также возложена миссия – формировать у выпускников четкий набор компетенций, требуемый на производстве и зафиксированный в профессиональных стандартах. Таким образом перед вузовским сообществом стоит задача соответствовать требованиям ФГОС и отвечать задачам экономики, производства, отрасли. Естественно, что корпоративные университеты, находясь в непосредственной близости от производства, в первую очередь нацелены на обеспечение сотрудников всеми необходимыми компетенциями, однако вузам также необходимо выстраивать тесные и взаимовыгодные связи с представителями отрасли, для того что бы отвечать на появляющиеся вызовы.

В ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» сформировалась собственная схема организации корпоративного обучения, которая ориентирована на различные организации-партнеры и отвечает как их запросам, так и требованиям ФГОСов.

В зависимости от уровня получаемого образования, входного уровня знаний обучающегося и особенных требований заказчика для обучения предлагается несколько вариантов. При необходимости получения определенных базовых знаний и оценивая уровень первоначальных знаний, возможно корректировать уровень обучающихся дополнительной подготовкой в 1 семестре, а также освоением рабочей профессии. При такой схеме в первый год обучения усиленное внимание уделяется теоретической подготовке. Если привлечение к производству возможно с первого семестра (например, для программ магистратуры), то реализация учебного процесса происходит по схеме: три дня очное обучение и три дня на производстве. При этом на производстве могут проходить лекции и мастер-классы от специалистов предприятия либо практическая подготовка. Если квалификационный и компетентностный потенциал ученической группы позволяет, то реализуется схема обучения в дистанционном формате при полном трудоустройстве обучающихся. В других случаях трудоустройство осуществляется либо на выпускном курсе, либо гарантируется после окончания обучения.

Таким образом, в университете появилась возможность сформировать для каждого партнера собственную схему реализации корпоративного обучения. Программы корпоративного обучения всегда проектируются рабочей группой, в состав которой входят представители выпускающей кафедры и организации-партнера, определяя общую направленность, отразив её суть в учебном плане, а структуру в графике учебного процесса. Особое внимание уделяется и кадровому составу, так как в данном случае к образовательному процессу привлекается большое количество специалистов отрасли, не только в рамках реализации практической подготовки, но и в рамках теоретического обучения.

Практика реализации корпоративных групп в УГНТУ показывает наличие преимуществ как для обучающихся, так и для организаций-партнеров. Среди преимуществ, получаемых обучающимися можно выделить следующие:

- возможность формирования гибкого графика обучения, позволяющего реализовать собственную образовательно-профессиональную траекторию и совместить обучение с профессиональной деятельностью;

- реализация системы наставничества в рамках практической подготовки на предприятиях-партнерах позволяет сократить период адаптации, снизить риски начального этапа включения в производственные процессы;
- научно-исследовательская деятельность, дипломное проектирование и вся проектная деятельность осуществляется на базе материалов организации-партнера, что позволяет в большей степени обеспечить практическую значимость исследований;
- закрепление теоретических знаний, полученных на дисциплинах на базе организации-партнера в рамках реализации практической подготовки;
- гарантированное трудоустройство в зависимости от специфики реализации схемы обучения (на входе, после освоения ядерной программы, на выходе);
- возможность сокращения сроков обучения при наличии предыдущего базового образования;
- возможность обучения на бюджетной основе;
- возможность использования инфраструктуры как образовательной организации, так и организации-партнера в зависимости от специфики дисциплины.

Преимущества, получаемые компанией-партнером:

- возможность объективной оценки будущих специалистов для принятия решения о приеме на работу в компанию, то есть снижается необходимость посещения или организации ярмарки вакансий, оценки новых, незнакомых потенциальных кадров, вместо этого организация влияет на процесс подготовки кадров, следит за формированием собственного кадрового резерва;
- компания имеет возможность эффективной работы с будущим молодым специалистом, в течение года или двух «обкатывая» его в различных производственных условиях, выявляя наиболее способных;
- обучение максимально приближенно к запросам производства, так как при формировании учебного плана учитывалось мнение представителей компании, также имеется возможность корректировки элективного блока дисциплин, добавления факультативных курсов;
- значительно снижаются риски и стресс на начальных этапах трудоустройства, то есть происходит «плавное» вхождение в трудовую деятельность, сокращение затрат на адаптацию будущего специалиста;
- организация практик и стажировок, совмещённых с теоретическим обучением;
- предоставление гибкого графика учебного процесса и индивидуальных образовательных траекторий позволяет организовать серьезный пул сотрудников, совмещающих работу с обучением;
- участие сотрудников предприятия в реализации учебного процесса, чтении лекций, проведение практик и мастер-классов позволяет обеспечить отражение специфики деятельности отрасли и предприятия в учебных материалах;
- в учебном процессе используется проектно-ориентированный подход — обучающиеся выполняют задания и отрабатывают практические навыки по дисциплине на предприятиях — под руководством куратора от компании, а также используют задачи компании для проектирования и исследовательской деятельности.

За последние 5 лет ФГБОУ ВО УГНТУ получил возможность реализовать несколько программ корпоративного обучения, представим несколько из них:

1. Программа магистратуры «Технический контроль и диагностирование объектов и сооружений нефтегазового комплекса» направление подготовки 21.04.01 Нефтегазовое дело.
2. Корпоративная программа бакалавриата «Оборудование и технология сварочного производства» направление подготовки 15.03.01 «Машиностроение».
3. Корпоративные программы бакалавриата по направлениям подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», 18.03.01 «Химическая технология», 18.03.02

«Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

4. Корпоративная программа бакалавриата «Бурение нефтяных и газовых скважин» направление подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело.

5. Корпоративная программа бакалавриата «Нефтегазовая геология и геофизика» направление подготовки 05.03.01 Геология.

6. Корпоративные программы бакалавриата по направлению подготовки 18.04.01 «Химическая технология».

7. Корпоративные магистерские программы: «Цифровые технологии в разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений», «Интегрированное концептуальное проектирование месторождений» направления подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело».

8. Программа магистратуры «Цифровые технологии в газовой промышленности» направления подготовки 27.04.04 Управление в технических системах.

9. Программа магистратуры «Администрирование и управление проектами в нефтяной отрасли» направление подготовки 09.04.01 «Информатика и вычислительная техника».

10. Программа магистратуры «Организационное развитие и управление персоналом в нефтяной и газовой промышленности» направление подготовки 38.04.02 «Менеджмент».

Общую схему реализации можно представить следующим образом:

Общая схема реализации мини-профилей

1 период обучения	2 период обучения	3 период обучения	4 период обучения
Теоретическое обучение (вебинары) Дистанционная самостоятельная работа Промежуточная аттестация (очно)	Практические занятия (вебинары) Дистанционная самостоятельная работа Промежуточная аттестация (очно) Практика, НИР (на базе предприятия-партнера)	Практические занятия (вебинары) Дистанционная самостоятельная работа Промежуточная аттестация (очно) Практика, НИР (на базе предприятия-партнера)	Практика, НИР (на базе предприятия-партнера) Дистанционное дипломное проектирование ГИА (очно – 1 неделя)

Всего в университете реализуются более 50 корпоративных программ с для нескольких десятков организаций разных отраслей организационно-правовых форм.

Таким образом, видно, активную привязку предприятия-партнера к формированию востребованной им образовательной программы, которая нацелена на сокращение пути от студента до профессионала.

Следующим шагом УГНТУ при формировании кадров, востребованных рынком, является расширение и индивидуализация круга компетенций выпускника. Инструментом, позволяющим обеспечить решение этой задачи является предоставление возможности получения второй квалификации или рабочей профессии в процессе обучения. В УГНТУ реализуется широкий спектр направлений подготовки /специальностей (всего в лицензии представлено 28 укрупненных групп): 52 программы СПО, 41 программа бакалавриата, 10 программ специалитета, 31 программа магистратуры, 60 программ подготовка кадров высшей квалификации. Большинство укрупненных групп представлены полным набором уровней обучения (СПО-ВО).

Таким образом, в УГНТУ имеется образовательный потенциал для обеспечения возможности формирования уникальных комбинаций образовательных программ для освоения нескольких квалификаций. Так, например, в университете практикуется включение мини-профилей в основную образовательную программу. Несколько факультетов/институтов нефтяного университета,

реализующих технические и управленческие направления подготовки разработали для себя каталог мини-профилей, которые отличаясь от основной программы, дают возможность расширить собственную сферу профессиональных интересов и навыков, формируя уникальную траекторию обучения. Образовательные программы в данном случае имеют три основные части:

- ядерную программу (это часть, направленная на освоение универсальных и общепрофессиональных компетенций);
- основную специализацию (определяемая после второго курса профилизация, направленная на освоение профессиональных компетенций);
- дополнительную специализацию (мини-профиль).

Мини-профиль дает возможность приобрести дополнительные компетенции, способствующие развитию будущей карьеры, а также, что немаловажно, расширению кругозора.

Структура образовательного процесса

1 семестр	2 семестр	3 семестр	4 семестр
Освоение ЯДЕРНОЙ программы			
Профориентационные мероприятия		Выбор основной специализации	
5 семестр	6 семестр	7 семестр	8 семестр
Освоение ОСНОВНОЙ специализации (профиля)			
Получение ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ специализации (мини-профиля)			

Каталог минипрофилей или дополнительной специализации у разных факультетов/институтов свой, в зависимости от специфики реализуемых направлений подготовки и требований соответствующего рынка и отрасли. Перечень минипрофилей, предлагаемых к реализации для разных направлений подготовки университета представлен в таблице:

Перечень мини-профилей

№ п/п	Направление подготовки/ Специальность	Мини-профили, предлагаемые к освоению
1.	08.03.01 Строительство	– Проектирование строительных конструкций; – Технология строительного производства.
2.	09.03.03 Прикладная информатика	– Коммуникации и гибкие навыки; – Экономическое развитие и информационная среда; – Обработка и анализ данных; – Психология управления людьми.
3.	38.03.01 Экономика	
4.	38.03.02 Менеджмент	
5.	15.03.01 Машиностроение	– Электротехническое оборудование и промышленная электроника; – Промышленная роботизация; – Прикладное программирование; – Эксплуатация объектов транспорта и хранения нефти и газа в осложненных условиях; – Цифровое проектирование технологических процессов нефтегазопереработки.
6.	15.03.02 Технологические машины и оборудование	
7.	18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	

№ п/п	Направление подготовки/ Специальность	Мини-профили, предлагаемые к освоению
8.	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств	– Искусственный интеллект в управлении;
9.	27.03.04 Управление в технических системах	– Цифровые двойники предприятий; – Предиктивная аналитика; – Программное обеспечение в системах управления; – Телекоммуникации; – Метрология; – Мобильная робототехника.
10.	21.03.01 Нефтегазовое дело	– Сбор, подготовка, транспорт и хранение нефти и газа; – Разведка, бурение, разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений;
11.	09.03.03 Прикладная информатика	– Цифровые экосистемы и этика цифровизации; – Проектирование медиа-контента, инфографики и фирменного стиля; – Зеленая экономика; – Бизнес-разведка и бизнеса-аналитика; – Проектирование и управление разработкой SMART-сервисов и мобильных приложений в креативных индустриях; – Правовое обеспечение бизнеса; – Обеспечение устойчивого развития территории и бизнеса; – Персонализированное питание как основа комфортной среды человека и бизнеса.
12.	38.03.01 Экономика	
13.	38.03.02 Менеджмент	
14.	38.03.04 Государственное и муниципальное управление	
15.	41.03.06 Публичная политика и социальные науки	
16.	41.03.01 Зарубежное регионоведение	
17.	43.03.02 Туризм	
18.	43.03.03 Гостиничное дело	
19.	38.03.01 Экономика	– Основы финансового инжиниринга; – Учет и финансы в строительстве; – Бухгалтерский учет и аудит; – Налоги и налогообложение.
20.	21.03.01 Нефтегазовое дело	– Прикладная информатика; – Информационные технологии в отрасли; – Цифровая культура.
21.	18.03.01 Химическая технология	
22.	08.03.01 Строительство	
23.	38.05.01 Экономическая безопасность	– Проектирование медиа-контента, инфографики и фирменного стиля; – Зеленая экономика; – Правовое обеспечение бизнеса.
24.	18.03.01 Химическая технология	– Управление процессами нефтегазопереработки и нефтегазохимии; – Научные исследования в области нефтегазопереработки и нефтегазохимии; – Цифровые технологии нефтегазопереработки и нефтегазохимии; – Экологическая безопасность нефтегазо-переработки и нефтегазохимии; – Технология химического анализа.
25.	18.03.01 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	

Мини-профиль является обязательной частью основной образовательной программы, и в ходе реализации учебного процесса каждый обучающийся получает возможность его свободного выбора. Выбор осуществляется с учетом требований потенциального работодателя, на которого ориентирован студент, собственных способностей и рекомендаций научного руководителя. Программа мини-профилей включает три-четыре дисциплины (12–16 зачетных единиц) на старших курсах обучения. Программы мини-профилей тесно связаны с курсами дополнительных образовательных программ, так как их реализация будет подтверждаться и документами ДОП, получаемыми вместе с дипломом о высшем образовании и будет являться дополнительным подтверждением освоения компетенций.

Следующим способом расширения имеющихся навыков и компетенций обучающегося является освоение рабочих профессий, которые в большинстве случаев необходимы для реализации практической подготовки на промышленных предприятиях. Общая схема схожа с реализацией мини-профилей, часть дисциплин из основного учебного процесса, являются обязательными и должны быть освоены. По итогам обучающийся получит подтверждающий документ и возможность трудоустройства на период прохождения практик. Так, например, обучающиеся горно-нефтяного факультета и факультета трубопроводного транспорта имеют возможность освоить рабочие профессии «Сварщик», «Линейный трубопроводчик», «Оператор товарный» и другие. Наличие удостоверения позволит проходить практику на местах с особым допуском и трудоустроиться на период прохождения практической подготовки.

Связующее звено между организациями-партнерами и образовательным процессом, дополнительная возможность проработать производственными задачи и выявить ценные кадры для дальнейшего трудоустройства – это реализация дисциплины «Проектные мастерские». «Проектные мастерские» – это межфакультетский, междисциплинарный курс, в рамках которого формируется и развиваются проектные навыки. Предприятия, имеющие запрос на решение проблем, могут получить для разработки межфакультетскую команду под руководством преподавателя, которая в течение одного семестра, или целого года (в зависимости от сложности проекта) будет разрабатывать и реализовывать проект. В процессе предусмотрены контакты с заказчиком, корректировки мероприятий проекта, при необходимости, усиление команды новыми специалистами, если того требует реализация проекта. Преподавателем в данном случае выполняется роль трекеров, общий контроль выполнения мероприятий и организационная помощь. Именно студенческие команды генерируют варианты решения обозначенной проблемы и идеи проекта, продумывают и рассчитывают наиболее эффективные способы их реализации и непосредственно участвуют в создании продукта, проведении мероприятий и т.д. В результате, заказчик может получить работоспособный продукт, решенную проблему, либо обоснованное, перспективное, новое направление, а команда участников проекта, состоящая из обучающихся 2–4 курсов получает возможность показать собственные навыки, проявить инициативу, выявить необходимость дополнительного обучения и реализованный проект в портфолио. Процесс реализации проектной деятельности, организации взаимодействия между всеми заинтересованными сторонами, контроля разработки и реализации осуществляется с помощью Информационной платформы по проектной деятельности (VProekte), также разработанной студентами УГНТУ.

Освоение нескольких компетенций и получение более широкого, а главное уникального перечня навыков, дает возможность «прокачаться» в нескольких близких, либо взаимодополняющих сферах, тем самым повысить собственную конкурентоспособность. Кроме всех обозначенных ранее преимуществ, подобный формат обучения развивает критическое мышление, позволяет анализировать информацию, повышать гибкость, адаптивность и интеллектуальный потенциал.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» имеет большой опыт взаимодействия с организациями-партнерами по формированию образовательных

программ, востребованных непосредственно ими, привлечения их к реализации учебного процесса в разных формах. В целом, такое взаимодействие помогает формировать образовательные программы, более адаптированные к технологическому миру, отвечающие всем современным запросам внешней среды (государства, общества, экономики), а выпускники, воспользовавшиеся всеми предоставленными им возможностями обучения, становятся более устойчивы к кризисам, конкурентоспособны и востребованы на рынке, что и отвечает основной миссии университета.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Катькало В.С., Шумкова Н.В., Волков Д.Л., Дементьев И.А. Корпоративные университеты России – 2023 / подред. В.С. Катькало, Н.В. Шумковой; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2023. 280 с. 1000 экз. ISBN 978-5-7598-2973-7 (в обл.). ISBN 978-5-7598-4036-7 (e-book).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МОГУЧЕВ Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов», проректор по учебной работе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

КАРАЧУРИНА Регина Фаритовна – кандидат экономических наук, доцент Уфимской высшей школы экономики и управления, начальник управления развития образования ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

ГАБИДУЛЛИНА Элина Винеровна – кандидат экономических наук, доцент Института экосистем бизнеса и креативных индустрий ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Aleksandr I. MOGUCHEV – *Ufa State Petroleum Technological University (USPTU).*

Regina F. KARACHURINA – *Ufa State Petroleum Technological University (USPTU).*

Elina V. GABIDULLINA – *Ufa State Petroleum Technological University (USPTU).*

Д.В. Богданов

НОЦ «Газпромнефть-Политех», Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

НОЦ «ГАЗПРОМНЕФТЬ-ПОЛИТЕХ» – ВКЛАД В НАУКУ И ОБРАЗОВАНИЕ

D.V. Bogdanov

Gazpromneft-Polytech Research & Education Center, Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

GAZPROMNEFT-POLYTECH RESEARCH & EDUCATION CENTER – ADVANCING SCIENCE AND KNOWLEDGE

«Научно-образовательный центр «Газпромнефть-Политех» создает эффективный мост между фундаментальной наукой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) и практическими задачами нефтегазовой отрасли. НОЦ трансформирует научный потенциал в инженерные решения, инновационные проекты и готовит высококвалифицированные кадры для нефтегазодобычи!»

Богданов Дмитрий Валерьевич, директор НОЦ «Газпромнефть-Политех»

«Научно-образовательный центр «Газпромнефть-Политех» — это команда из 140+ высококвалифицированных специалистов в областях разработки месторождений, математического моделирования, машинного обучения, Data Science, программирования, фундаментальной науки (механики, математики и физики).

Основными направлениями научной деятельности являются:

- разработка нефтегазоконденсатных месторождений, которая включает исследование механизмов фильтрации, анализ и оптимизацию разработки месторождений, поиск геолого-технических мероприятий, направленных на повышение и интенсификацию добычи, оценку эффективности различных сценариев разработки месторождений;
- моделирование гидравлического разрыва пласта (ГРП), в частности модели ГРП в традиционных коллекторах (Pseudo3D, Planar3D, Full3D), модели ГРП/МГРП в трещиноватых коллекторах, перенос проппанта, повторный ГРП;
- моделирование микросейсмических событий при ГРП и их интерпретация;
- моделирование фильтрации с автоматизацией построения карт пластовых давлений и асимптотическими методами учета неоднородности пласта;
- применение методов машинного обучения для реконструкции данных геофизических исследований скважин, создания метамоделей ГРП и методов увеличения нефтеотдачи пластов, прогнозирования забойного давления и свойств керна;
- моделирование реальных месторождений и транспортировки многокомпонентных газовых сред;
- наземное обустройство месторождений, включающее способы эффективной утилизации попутного нефтяного газа.

В состав «Газпромнефть-Политех» входит лаборатория «Цифровое моделирование подземных нефтегазовых резервуаров и well-test-анализ», которая специализируется на разработке, применении и улучшении цифровых моделей для изучения и управления подземными нефтегазовыми резервуарами. Основное внимание уделяется моделированию процессов и проведению well-test-анализа (анализа испытаний скважин) для оценки характеристик пластов и эффективности добычи. Цель лаборатории – создание высокоточных моделей и алгоритмов для оптимизации разработки месторождений, повышения коэффициента извлечения нефти и газа и обеспечения безопасной эксплуатации месторождений.

Центр реализует уникальную образовательную траекторию «Школа – Вуз – Компания», направленную на привлечение талантливой молодежи в нефтегазовую отрасль. Программа предполагает обучение на совместных с ПАО «Газпром нефть» образовательных программах и трудоустройство в НОЦ «Газпромнефть-Политех», Научно-технический центр «Газпром нефти» и другие подразделения компании.

Сотрудники научного центра принимают участие в передовых конференциях, конгрессах и чемпионатах, публикуют научные статьи и исследования. Развитие ключевых навыков для решения сложных инженерных задач в нефтегазовой отрасли, проведение прикладных исследований и подготовка высококвалифицированных специалистов – основные компетенции Научно-образовательного центра.

Более подробно о проектах и работниках центра на сайте: gpn.spbstu.ru



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БОГДАНОВ Дмитрий Валерьевич – директор НОЦ «Газпромнефть-Политех», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
E-mail: gpn@spbstu.ru

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Dmitry V. BOGDANOV – general manager, Gazpromneft-Polytech Research & Education Center, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
E-mail: gpn@spbstu.ru