

Том 29, №3, 2023



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

*Васильев Ю.С.*, главный редактор, академик РАН, 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;  
*Зеуровский М.З.*, ин. Член РАН, академик НАН Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина;

*Клименко 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;

*Саркисов А.А.*, академик РАН, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Российская Федерация;

*Федоров М.П.*, академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

*Васильев Ю.С.*, главный редактор, д-р техн. наук, академик РАН, научный руководитель Санкт-Петербургского политехнического университета 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;

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

*Колсуи 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;

*Сереев В.В.*, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, проректор по организационно-правовым вопросам, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;

*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;

*Цемленко 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; Д.Ю. Алексеева – перевод на английский язык.

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

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

Дата выхода: 29.09.2023

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023

29 (3) 2023



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

*Vasiliev Yu.S.* — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

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

*Zgurovskiy M.Z.* — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine;

*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;

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

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

### EDITORIAL BOARD

*Vasiliev Yu.S.* — editor-in-chief, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 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;

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

*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;

*Tolchko 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; D.Yu. Alekseeva – English translation

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

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

Release date: 29.09.2023

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2023

## Содержание

### Энергетика. Электротехника

<b>Цзян Х.</b> Протонообменные мембранные топливные элементы.....	7
<b>Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э.</b> Создание поршневых уплотнений с повышенным ресурсом работы для бесшмазочных малорасходных тихоходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления.....	24
<b>Гулов А.М., Колычев А.В.</b> Модель опоры воздушной линии электропередачи в задачах молниезащиты.....	31
<b>Завалов А.А., Кузьмин И.С., Куликовский В.С.</b> Влияние компенсации реактивной мощности на термическую устойчивость нейтрального провода в низковольтных сетях городов.....	43
<b>Завалов А.А., Кузьмин С.В., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А.</b> Компенсация реактивной мощности в электрических сетях 0,4–10 кВ городов северных регионов.....	57
<b>Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., Железняк В.Н.</b> Повышение эксплуатационной надёжности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки.....	74

### Металлургия. Материаловедение

<b>Ерутин Д.П., Попович А.А., Суфияров В.Ш.</b> Влияние угла поворота сканирования на плотность композиционного материала 1СР/медь в процессе селективного лазерного плавления.....	90
<b>Лаврентьев А.Ю., Какорин Д.Д., Барчуков Д.А.</b> Высокопроизводительный способ изготовления биметаллического дискового ножа.....	100
<b>Троцкий М.В., Попович А.А., Каминский В.В., Петрович С.Ю.</b> Разработка технологических основ получения многокомпонентных соединений на основе нитридов титана (Ti3B2N) методами механохимического синтеза и ИПС.....	111
<b>Евсин М.Г.</b> Реологические и трибологические свойства смазочных композиций, модифицированных фторидом графена.....	124

# Contents

## Energetics. Electrical engineering

<b>Jiang H.</b> Proton exchange membrane fuel cells.....	16
<b>Busarov S.S., Kobilskiy R.E.</b> Design of piston seals with increased service life for lubrication-free low-flow low-speed reciprocating compressors of medium and high pressure.....	24
<b>Gulov A.M., Kolychev A.V.</b> Overhead line tower model in tasks of lightning protection.....	31
<b>Zavalov A.A., Kuzmin I.S., Kulikovskiy V.S.</b> Influence of reactive power compensation on thermal stability of neutral wire in low voltage city networks.....	43
<b>Zavalov A.A., Kuzmin S.V., Kuzmin R.S., Menshikov V.A.</b> Reactive power compensation in electrical networks of 0.4–10 kV in cities of northern regions.....	57
<b>Mannanov E.R., Kostelov A.M., Filin A.G., Zheleznyak V.N.</b> Improvement of operational reliability of air-cooled turbogenerators for a gas turbine plant.....	74

## Metallurgy. Material Science

<b>Erutin D.P., Popovich A.A., Sufiiarov V.S.</b> Effect of scanning angle on the density of 1CP/copper selective laser melted composite material.....	90
<b>Lavrent'ev A.Yu., Kakorin D.D., Barchukov D.A.</b> High-performance method of manufacturing a bimetallic disc knife.....	100
<b>Trotsky M.V., Popovich A.A., Kaminskii V.V., Petrovich S.Yu.</b> Development of technological fundamentals for production of multicomponent compounds based on titanium nitroborides (Ti3B2N) by mechanochemical synthesis and SPS.....	111
<b>Evsin M.G.</b> Rheological and tribological properties of graphene fluoride modified lubricating compositions.....	124

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: Х. Цзян Протонообменные мембранные топливные элементы. 4-й ежегодный доклад Ассоциации "Глобальная энергия". С. 94–102. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

Х. Цзян

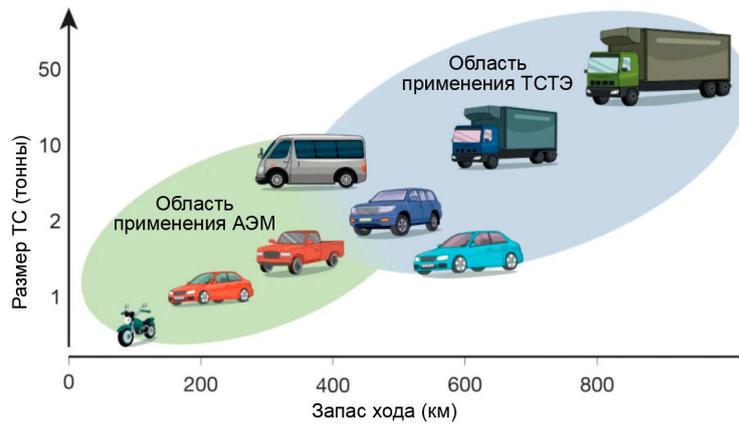
Институт биоэнергетики и технологии биопроцессов Циндао,  
Китайская академия наук, Шаньдун, Китай

## ПРОТОНООБМЕННЫЕ МЕМБРАННЫЕ ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

**Введение.** Рост уровня глобального потребления энергии и загрязнение окружающей среды послужили толчком к поиску экологически чистых и возобновляемых альтернатив энергии, которые позволили бы удовлетворять потребности в энергии не за счет углеродного цикла. Благодаря своей экологичности и высокой удельной энергоемкости водород считается экологически чистым топливом и накопителем энергии, который найдет свое применение в энергетике будущего [1]. В водородном цикле решающее значение для преобразования энергии водорода в электрическую энергию имеют транспортные средства на топливных элементах. По сравнению с обычными двигателями внутреннего сгорания, используемыми сегодня во многих транспортных средствах, водородные топливные элементы обладают рядом несомненных преимуществ. Их эксплуатация обходится дешевле, они обладают более высокой эффективностью и надежностью, а вместо парниковых газов они выделяют чистую воду и тепло [2]. Эти достоинства указывают на то, что топливные элементы представляют собой перспективную технологию преобразования энергии для «зеленого» будущего [3].

Топливные элементы с протонообменной мембраной (ТЭПМ) представляют собой наиболее распространенный тип топливных элементов. Они могут преобразовывать химическую энергию топлива в электричество с КПД не менее 60%. Являясь универсальной технологией производства электроэнергии нового поколения, ТЭПМ способны работать при низких температурах (~80–120°C), питая электроэнергией транспортные средства и портативные устройства, а также крупные стационарные энергосистемы. Электрохимическая конверсия водорода в топливных элементах не производит вредных выбросов. Единственными отходами водородных топливных элементов являются чистая вода и потенциально полезное тепло; таким образом, в месте эксплуатации в воздух не выбрасываются загрязнения, вызывающие проблемы со здоровьем или парниковый эффект. Кроме того, топливные элементы работают бесшумно, что позволяет избежать возможного шумового загрязнения.

Топливные элементы зачастую сравнивают с батареями, поскольку электродвигатели, работающие от батарей, также являются перспективным низкоуглеродным решением [4]. На рис. 1 приводится схема сравнения их технических характеристик (Цзян и др.) [5]. Топливные элементы обычно обладают более высокой плотностью энергии, чем батареи, благодаря свойствам, присущим используемому в них топливу. Топливным элементам требуется меньше времени для перезарядки по сравнению с батареями благодаря более быстрой заправке водородом. Топливные элементы способны функционировать в условиях низких температур, но в батареях обычно наблюдается значительно сниженная разрядная емкость. Что касается затрат, то здесь ситуация



	АЭМ	ТСТЭ
<b>Накопитель</b>	Литий-ионные батареи	Водород
<b>Удельная энергоёмкость</b>	<200 Ватт-час/кг	~300 Ватт-час/кг
<b>Время заправки</b>	Часы	Минуты
<b>Низкая температура</b>	Серьезная деградация	Показано для температуры -30°C
<b>Эффективность</b>	~90%	~60%
<b>Инфраструктура</b>	Сеть и зарядные станции	Водородные заправочные станции

Рис. 1. Сравнение технических характеристик и применения транспортных средств на топливных элементах (ТСТЭ) и аккумуляторных электромобилей (АЭМ) в автомобильном транспорте будущего

несколько усложняется. При нынешнем уровне стоимости электроэнергии и водорода использование батарей в транспортных средствах малой дальности (< 200 миль, 322 км) обходится немного дешевле, чем использование топливных элементов; однако же, затраты становятся сопоставимыми для транспортных средств, используемых для перевозок на большие расстояния (> 300 миль, 483 км) [6]. Таким образом, по своим техническим характеристикам топливные элементы в настоящее время больше подходят для дальних и большегрузных перевозок, тогда как батареи имеют конкурентные преимущества для ближних и малотоннажных перевозок [5].

Топливные элементы обладают высокой энергетической эффективностью, высокой удельной мощностью, быстрым запуском, и не оставляют углеродный след. Эти свойства привлекают к ним все больше и больше внимания. За последние несколько десятилетий, благодаря использованию ТЭПМ, был достигнут значительный прогресс в разработке транспортных средств на топливных элементах. Учитывая производительность, стоимость и долговечность существующих моделей, крупномасштабная коммерциализация ТЭПМ вполне вероятна.

### Функционирование ТЭПМ

ТЭПМ используют твердый полимер в качестве электролита и пористый углерод, наполненный катализатором, в качестве электродов (рис. 2а). Вместе они составляют основной компонент — мембранный блок электродов (МБЭ). Типичный МБЭ включает в себя протонообменную мембрану (ПМ), каталитические слои (КС) и газодиффузионные слои (ГДС) с микропорами. В составе ТЭПМ мембрана ПМ или полимерный электролит, в настоящее время на основе перфторсульфоновой кислоты (ПФСК), действует как электрический изолятор, проводник протонов

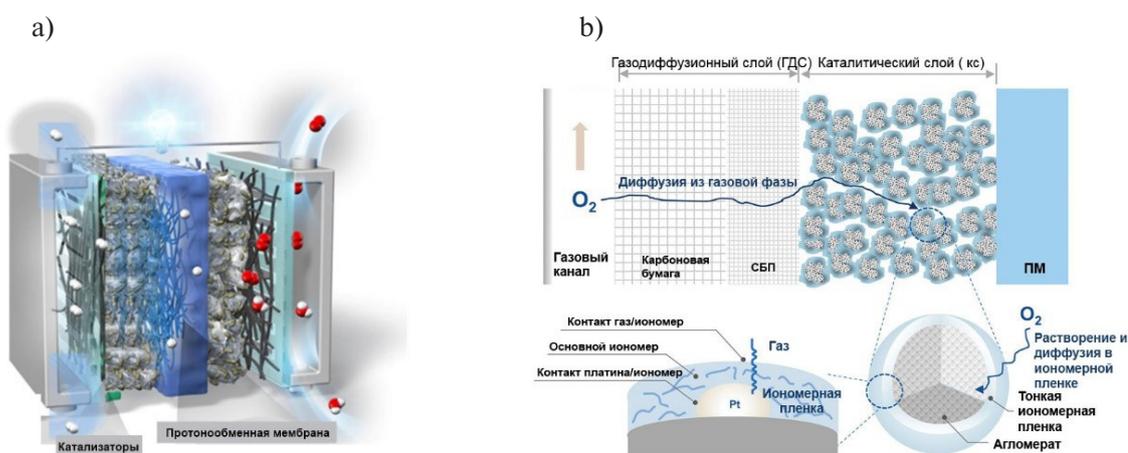


Рис. 2. Схематическое изображение (а) структуры ТЭПМ и (б) принципа работы ТЭПМ

и газоотделитель. С обеих сторон протонообменной мембраны (рис. 2а), где происходят реакции восстановления кислорода и окисления водорода, добавляется КС, куда обычно входит насыщенный платиной углерод, тонко диспергированный в иономерах. За пределами КС расположены ГДС и слои карбоновой бумаги, которые облегчают распределение газа и удаление фильтрата, а также способствуют механической поддержке и электрической связи. Для эффективной работы МБЭ типичного одиночного ТЭПМ необходимы биполярные пластины (БП). БП, выполненные в основном из углерода, металла или композитов, обеспечивают электропроводность между ячейками и жесткими опорами для стека, на котором формируются поля течения реагентов и теплоносителей. Эти компоненты критически важны, их уникальные свойства и характеристики влияют на общую производительность, стоимость и долговечность ТЭПМ.

ТЭПМ работают как батареи; однако же, в отличие от батарей, они могут производить тепло и электроэнергию до тех пор, пока подается топливо, и не требуют подзарядки. МБЭ является частью топливного элемента, производящего электроэнергию (рис. 2б). В частности, когда водород подается на анод в водородном топливном элементе, катализаторы, расположенные на анодном КС, разлагают молекулы водорода на электроны и протоны. После этого электроны и протоны перемещаются к катоду разными путями. Электроны переносятся по внешней цепи, индуцируя электрический ток, а протоны мигрируют через ПМ к катализаторам на катодной КС, и в конечном итоге объединяются с подаваемым кислородом и электронами, производя тепло и воду. ГДС обеспечивает баланс между высвобождением воды, которое поддерживает поры открытыми для диффузии топливного газа в КС, и удержанием воды, которое поддерживает проводимость мембраны. Поскольку в типичных рабочих условиях один топливный элемент вырабатывает менее 1 В, что вряд ли удовлетворяет требованиям большинства областей применения, БП последовательно соединяют несколько топливных элементов и, таким образом, позволяют обеспечить эффективное напряжение на выходе.

За последние десятилетия был достигнут впечатляющий прогресс в преодолении технических сложностей ТЭПМ. В применении к легковым автомобилям усовершенствованные одиночные топливные элементы (общая загрузка Pt  $0,175 \text{ мг см}^{-2}$ , загрузка катода Pt  $0,15 \text{ мг см}^{-2}$ ) могут поддерживать удельную мощность до  $911 \text{ мВт см}^{-2}$  при напряжении на ячейке  $0,65 \text{ В}$  в течение 8000 часов [9]. Соответствующая общая стоимость стека по сравнению с 2000 г., когда основная часть расходов на катализаторы и БП составляла 40% и 22% соответственно [9], снизилась на 8 долл. США/кВт, к 2022 г. составив примерно 31 долл. США/кВт. Эталонном для развития и инноваций в области ТЭПМ может стать пассажирский автомобиль Toyota Mirai на топливных элементах Mirai. В 2014 году Toyota запустила первую коммерческую серийную модель Mirai. Теперь Mirai

второго поколения, запущенный в конце 2020 года, обеспечивает удельную мощность стека с торцевыми пластинами и без них, 4,4 кВт л<sup>-1</sup> и 5,4 кВт л<sup>-1</sup> соответственно, и добился увеличения на 42% и 54% по сравнению с аналогичными показателями в первого поколения [10]. Однако же, розничная цена Mirai достигает 57 000 долларов США, и в Соединенных Штатах сдаются в аренду или продаются лишь около 7 000 устройств [11]. Напротив, рынок аккумуляторных электромобилей за последние два десятилетия значительно расширился благодаря быстрому техническому развитию литий-ионных аккумуляторов в сочетании с подзарядкой от домашней сети. Соответственно, электромобили, работающие на ТЭПМ, очевидно, находятся на ранних стадиях коммерческого внедрения. Их себестоимость еще не выдерживает конкуренции, а современные методы снижения стоимости могут значительно сократить срок службы стека. Основными решающими ограничениями для широкой коммерциализации пакета ТЭПМ являются ограниченная удельная мощность, стоимость, сравнимая со стоимостью бензина, и неудовлетворительная износостойкость. Поэтому для разработки ТЭПМ жизненно важны повышение удельной мощности, снижение эксплуатационных расходов и продление срока службы.

### Разработка ТЭПМ

Для разработки ТЭПМ следующего поколения были приложены огромные научные усилия. На рис. 3 авторства Цзяо и др. хорошо представлены текущие возможности и проблемы на уровне компонентов [5]. Направление развития этих компонентов, включая их взаимосвязь и разработку, определяет потенциальные ожидания и крупномасштабную коммерциализацию ТЭПМ.

**ГДС:** Основным выбором для промышленных ТЭПМ является карбоновая бумага. Однако же, газопроницаемость и управление водобалансом, связанные с ее массообменом, относительно медленны, а межфазное сопротивление, особенно между ГДС и БП, очень велико. Была сертифицирована структурная модификация, в частности, регулирование размера пор ГДС [12] и лазерная перфорация [13]. Например, ГДС с достаточным градиентом размера пор, в сочетании с углеродным волокном, могут снизить контактное сопротивление и облегчить удаление воды и подачу реагентов за счет создания более эффективного моста между МБЭ и БП. Совсем недавно для снижения контактного сопротивления были предложены также ГДС из металлического листа [14], но их эксплуатация сопровождается коррозией, поэтому необходимо изучение новых материалов. Таким образом, до сих пор ожидается, что в будущих ТЭПМ будет использоваться регулируемая карбоновая бумага.

**КС:** Как основные затраты, так и максимальная удельная мощность четко ассоциируются с катализаторами на КЛ. В настоящее время в основном используется платиносодержащий углерод, диспергированный на иономерах, благодаря своей долговечности и превосходным характеристикам в электрохимической среде. Были рассмотрены три аспекта повышения производительности и снижения затрат: снижение содержания металлов платиновой группы (МПГ), изменение конструкции иономера и упорядочение структуры МБЭ.

При работе с катализаторами обычно используют три метода, нацеленные на то, чтобы снизить количество используемой платины и повысить их производительность и долговечность. Один из методов заключается в том, что наночастицы платины сплавляют с элементами переходных металлов или лантаноидами, такими как Ni, Co, Cu, Pt [15, 16]. Эти введенные атомы изменяют электронные свойства поверхности катализатора и ослабляют сильное взаимодействие поверхности с промежуточным звеном за счет сочетания эффектов деформации и лиганда, что позволяет оптимизировать перенос электронов [17]. Типичным примером является Pt<sub>3</sub>Ni(111) с внешним слоем, обогащенным Pt, и вторым атомным слоем, обогащенным Ni, который в 90 раз более активен, чем коммерческие катализаторы Pt/C [18]. Другим перспективным подходом является проектирование архитектур катализаторов, таких как оболочка ядра, наноклетки, нанопроволоки, нанокорпусы, нанокристаллы [19]. Согласно количественному определению, вы-

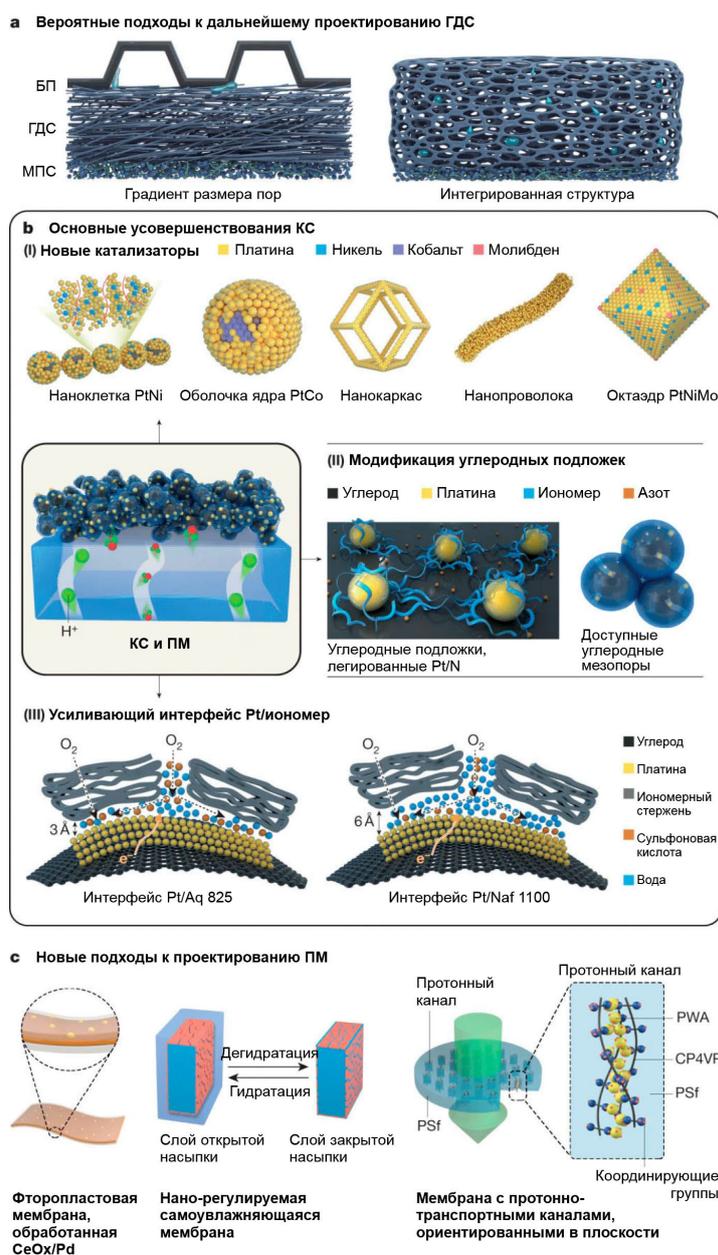


Рис. 3. Современные конструкции МБЭ: (а) два перспективных подхода к проектированию будущих ГДС, (b) важные достижения в КС, (с) современная методология разработки ПМ

полненному с помощью обобщенного метода координационных чисел, полые или слипающиеся наночастицы Pt с большим количеством вогнутых участков позволяют значительно улучшить кинетику электрокатализа [20]. Разработка катализаторов, не содержащих металлов платиновой группы, так же может способствовать снижению затрат [8, 21, 22]. Например, переходные металлы в сочетании с углеродом, легированным азотом, демонстрируют эффективность восстановления кислорода, сравнимую с современными катализаторами Pt/C как в полуэлементных, так и в рабочих условиях ТЭПМ [23]. Однако же, вследствие непостоянных характеристик, демонстрируемых катализаторами в ходе испытаний полуэлементов и ТЭПМ, непостоянства наночастиц и нестабильной геометрии необходима стабилизация активных центров катализаторов, которая позволит повысить их устойчивость при сохранении сверхвысоких характеристик в рабочей среде ТЭПМ [24].

Иономеры помогают доставлять протоны от частиц и к частицам катализатора на КС. Их распределение оказывает существенное воздействие на использование платинового катализатора и ионную проводимость. По сравнению с обычной сажей углеродные носители, легированные азотом, и углеродные носители с внутренними порами нужного размера вполне можно использовать для обеспечения более равномерного покрытия иономера. Например, при применении чистого платинового катализатора углеродные подложки, легированные азотом, увеличивают удельную мощность ТЭПМ до  $1390 \text{ мВт/см}^{-2}$  [25]. Сокращение длины боковой цепи иономеров также может повысить объемы использования Pt и активизировать доставку протонов [26]. Тем не менее, для набухания/сжатия в воде по-прежнему будут требоваться высокостабильные иономеры с надежной водоудерживающей способностью.

Упорядоченные в структуру МБЭ обеспечивают эффективные пути массопереноса, что в свою очередь обеспечивает интенсивное воздействие на место реакции и утилизацию Pt. Эффективными способами создания МБЭ с упорядоченной структурой являются наноструктурированные тонкопленочные катализаторы 3М и массивы углерода в иономерах. Тонкопленочные наноструктурированные КС 3М обеспечивают плотность мощности до  $1000 \text{ мВт/см}^{-2}$  при сверхнизком содержании платины  $0,094 \text{ мг/см}^{-2}$  [27]. Упорядоченный в структуру МБЭ на основе вертикально ориентированных массивов углеродных нанотрубок также способен обеспечивать высокую плотность мощности,  $1560 \text{ мВт/см}^{-2}$ , с низкой загрузкой катода Pt ( $0,1 \text{ мг/см}^{-2}$ ) [28]. Как ожидается, применяя данные стратегии к катализаторам и архитектуре КС, можно будет добиться повышения мощности, снижения стоимости и увеличения срока службы ТЭПМ.

**ПМ:** Чтобы облегчить применение ТЭПМ, для будущих ТЭПМ желательно изобрести новую мембрану, обладающую высокой протонной проводимостью, хорошей электрохимической и механической стабильностью и низкой стоимостью. Один из основных способов – усовершенствование коммерческих мембран из перфторсульфоновой кислоты. Уменьшение толщины мембраны может снизить поверхностное сопротивление, облегчая перенос протонов и водоподачу. Однако же, при этом снизится электрохимическая и механическая стабильность. Кроме того, в устройствах Mirai первого поколения поле течения в пористой среде может быть использовано для расширения механической поддержки тонкого ПМ [29]. Также в коммерческой практике в мембрану включают соли церия для повышения стабильности тонких мембран. Например, в устройствах Mirai второго поколения были достигнуты улучшенные показатели электрохимической и механической устойчивости за счет введения солей церия в мембраны, несмотря на то, что толщина мембраны была примерно на 30% меньше [30]. Другой перспективный метод это поиск новых альтернатив мембранам из перфторсульфоновой кислоты. Среди них широко исследуются сульфированные углеводородные полимеры благодаря своей хорошей термической стабильности и протонной проводимости [31]. Кроме того, ожидается, что свойства мембран улучшит ориентация структур переноса протонов и включение в мембраны ферроцианидных групп. Соответственно, представляется, что мембраны из перфторсульфоновой кислоты все еще будут применяться в течение следующего десятилетия, но большее распространение, по-видимому, получат не столь дорогие неперфторированные ПМ.

**БП:** Массообменные свойства пакета ТЭПМ зависят от структуры поля потока БП. Более 30% стоимости и 70% объема всего стека ТЭПМ приходится на БП5. Для повышения массообменных свойств БП в основном использовали модификацию канально-реберной структуры и создание полей течения без ребер, но с пористой структурой или микро-перегородками. Например, перегородки, штампованные в виде рыбьей чешуи, используемые в трехмерном БП, облегчили массоперенос в Mirai первого поколения [32]. С точки зрения стоимости и объема интеграция компонентов обеспечивает более компактную ячеистую структуру.

Полное устранение ГДС, а именно интегрированной структуры БП-МБЭ, значительно уменьшает объем ТЭПМ и с успехом устраняет межфазный перенос массы, тепла и электронов [33].

Кроме того, долговечность БП, на которую оказывают влияние электрохимическая коррозия и механическая деградация, также представляет собой серьезный практический фактор. Обработка БП слоем пассивного покрытия, в том числе с формированием низкоомных оксидных пленок и антикоррозионных покрытий, позволяет повысить его долговременную стабильность [32]. Ожидается, что коммерциализации ТЭПМ будет способствовать точность и единообразие используемых в настоящее время металлических/углеродных БП и покрытий.

Иными словами, сегодня решающим направлением является создание усовершенствованной, управляемой и простой в производстве структурной конструкции для текущих ключевых компонентов ТЭПМ, в то время как разработка новых материалов обещает дать значительный импульс к окончательной крупномасштабной коммерциализации ТЭПМ.

### **ТЭПМ: сложности и возможности**

Всё больше стран начинают заботиться о развитии водородной энергетики, обращая особое внимание на инновации в области ТЭПМ. Такое развитие может ускорить модернизацию энергетики, обеспечить углеродную нейтральность и способствовать экономическому росту. Местные администрации и органы государственной власти прилагают значительные усилия, стремясь воспользоваться открывающимися возможностями. Китай, крупнейший производитель водорода с годовым объемом производства 33 миллиона тонн, в марте обнародовал свою первую в истории национальную водородную стратегию, в соответствии с которой к 2025 году на дорогах Китая будет эксплуатироваться более 50 000 электромобилей на водородных топливных элементах. Во многих европейских странах принят закон о запрете двигателей внутреннего сгорания и замене их двигателями на ТЭПМ. Европейский союз планирует запретить продажу новых автомобилей с двигателем внутреннего сгорания с 2035 года. Министерство энергетики США поддерживает исследования и разработки, связанные с топливными элементами, уже с конца 1970-х годов. При поддержке от правительства и промышленности, индустрия ТЭПМ будет быстро развиваться, аналогично индустрии литий-ионных аккумуляторов.

Однако же, для повышения производительности, снижения затрат и повышения долговечности ТЭПМ, а следовательно, их крупномасштабной коммерциализации, по-прежнему необходимы передовые технологии. Правительства многих стран установили соответствующие приоритеты исследований и разработок, способных обеспечить широкое коммерческое применение ТЭПМ. По данным Организации по развитию новой энергетики и промышленных технологий Японии, целевыми значениями удельной мощности автомобильного блока топливных элементов, установленными для 2030 и 2040 гг., являются 6,0 кВт л<sup>-1</sup> и 9,0 кВт л<sup>-1</sup> соответственно [34]. По заявлению Совместного предприятия Европейского Союза по топливным элементам и водороду 2 (EU-FCH2JU), целевая плотность мощности пакета ТЭПМ к 2024 г. должна составлять 9,3 кВт л<sup>-1</sup> (с торцевыми пластинами) при напряжении одного элемента 0,6 В и плотности тока 2,67 А см<sup>-2</sup> [35]. Министерство энергетики США установило значение целевой стоимости блока ТЭПМ для легковых автомобилей на уровне 40 долларов за киловатт к 2025 году и 60 долларов за киловатт для большегрузных автомобилей к 2030 году [9]. Тем не менее, эти целевые показатели затрат труднодостижимы в рамках текущей модели усовершенствованного стека, поскольку по прогнозам стоимость составит 50 и 145 долларов США за киловатт соответственно [9]. Таким образом, технологические инновации по-прежнему необходимы для того, чтобы добиться повышения удельной мощности этих критических компонентов, снижения затрат и повышения долговечности ТЭПМ.

### **Заключение**

Подводя итог, мы приходим к выводу, что ТЭПМ достигли ранней стадии индустриализации и коммерциализации, но их неосновным компонентам все еще необходимо преодолеть некоторые

технические барьеры. Тремя критериями для оценки свойств и характеристик этих важнейших компонентов являются производительность, стоимость и долговечность ТЭПМ. При наличии поддержки на государственном уровне, в рамках эффективной и действенной нормативно-правовой базы, в будущем возможно добиться успешной коммерциализации ТЭПМ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Bockris J.O.M.** A hydrogen economy. *Science* 176, 1323–1323 (1972).
- [2] **Fichtner J. et al.** Tailoring the oxygen reduction activity of Pt nanoparticles through surface defects: a simple top-down approach. *ACS catalysis* 10, 3131–3142 (2020).
- [3] **Mekhilef S., Saidur R., Safari A.** Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 981–989 (2012).
- [4] **Cano Z.P. et al.** Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy* 3, 279–289 (2018).
- [5] **Jiao K. et al.** Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells. *Nature* 595, 361–369 (2021).
- [6] **Gröger O., Gasteiger H.A., Suchsland J.-P.** Electromobility: Batteries or fuel cells? *Journal of The Electrochemical Society* 162, A2605 (2015).
- [7] **Miyake J. et al.** Rechargeable proton exchange membrane fuel cell containing an intrinsic hydrogen storage polymer. *Communications Chemistry* 3, 1–7 (2020).
- [8] **Tang M., Zhang S., Chen, S.** Pt utilization in proton exchange membrane fuel cells: structure impacting factors and mechanistic insights. *Chemical Society Reviews* (2022).
- [9] **James B.D.** Fuel Cell Cost and Performance Analysis (2022 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Annual Merit, 2022); [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/fc353\\_james\\_2022\\_o.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/fc353_james_2022_o.pdf)
- [10] Full specs of Toyota MIRAI 2021. Toyota USA [https://www.toyota.com/MIRAI/features/mileage\\_estimates/3002/3003](https://www.toyota.com/MIRAI/features/mileage_estimates/3002/3003) (2020).
- [11] **Shao M., Chang Q., Dodelet J.-P., Chenitz R.** Recent advances in electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *Chemical reviews* 116, 3594–3657 (2016).
- [12] **Li M. et al.** Ultrafine jagged platinum nanowires enable ultrahigh mass activity for the oxygen reduction reaction. *Science* 354, 1414–1419 (2016).
- [13] **Gerteisen D., Sadeler C.** Stability and performance improvement of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack by laser perforation of gas diffusion layers. *Journal of Power Sources* 195, 5252–5257 (2010).
- [14] **Tanaka S., Bradfield W.W., Legrand C., Malan A.G.** Numerical and experimental study of the effects of the electrical resistance and diffusivity under clamping pressure on the performance of a metallic gas-diffusion layer in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 330, 273–284 (2016).
- [15] **Oezaslan M., Hasché F., Strasser P.** PtCu<sub>3</sub>, PtCu and Pt<sub>3</sub>Cu alloy nanoparticle electrocatalysts for oxygen reduction reaction in alkaline and acidic media. *Journal of The Electrochemical Society* 159, B444 (2012).
- [16] **Stephens I.E., Bondarenko A.S., Grønbjerg U., Rossmeisl J., Chorkendorff I.** Understanding the electrocatalysis of oxygen reduction on platinum and its alloys. *Energy & Environmental Science* 5, 6744–6762 (2012).
- [17] **Kitchin J.R., Nørskov J.K., Barteau M.A., Chen J.** Role of strain and ligand effects in the modification of the electronic and chemical properties of bimetallic surfaces. *Physical Review Letters* 93, 156801 (2004).
- [18] **Stamenkovic V.R. et al.** Improved oxygen reduction activity on Pt<sub>3</sub>Ni (111) via increased surface site availability. *Science* 315, 493–497 (2007).
- [19] **Garlyyev B. et al.** Optimizing the size of platinum nanoparticles for enhanced mass activity in the electrochemical oxygen reduction reaction. *Angewandte Chemie International Edition* 58, 9596–9600 (2019).

- [20] **Calle-Vallejo F. et al.** Finding optimal surface sites on heterogeneous catalysts by counting nearest neighbors. *Science* 350, 185–189 (2015).
- [21] **Gai H. et al.** Sandwich-like hierarchical porous dual-carbon catalyst with more accessible sites for boosting oxygen reduction reaction. *Materials Today Energy* 21, 100809 (2021).
- [22] **Xue S., Liang Y., Hou S., Zhang Y., Jiang H.** Alpha-nickel hydroxide coating of metallic nickel for enhanced alkaline hydrogen evolution. *ChemSusChem* 15, e202201072 (2022).
- [23] **Wan X. et al.** Fe–N–C electrocatalyst with dense active sites and efficient mass transport for high-performance proton exchange membrane fuel cells. *Nature Catalysis* 2, 259–268 (2019).
- [24] **Lazaridis T., Stühmeier B.M., Gasteiger H.A., El-Sayed H.A.** Capabilities and limitations of rotating disk electrodes versus membrane electrode assemblies in the investigation of electrocatalysts. *Nature Catalysis* 5, 363–373 (2022).
- [25] **Ott S. et al.** Ionomer distribution control in porous carbon-supported catalyst layers for high-power and low Pt-loaded proton exchange membrane fuel cells. *Nature materials* 19, 77–85 (2020).
- [26] **Poojary S., Islam M.N., Shrivastava U.N., Roberts E.P., Karan K.** Transport and electrochemical interface properties of ionomers in Low-Pt loading catalyst layers: effect of ionomer equivalent weight and relative humidity. *Molecules* 25, 3387 (2020).
- [27] **Crowtz T., Dahn J.R.** Screening bifunctional Pt based NSTF catalysts for durability with the rotating disk electrode: The effect of Ir and Ru. *Journal of The Electrochemical Society* 165, F854 (2018).
- [28] **Murata S., Imanishi M., Hasegawa S., Namba R.** Vertically aligned carbon nanotube electrodes for high current density operating proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 253, 104–113 (2014).
- [29] **Wang Y., Diaz D.F.R., Chen K.S., Wang Z., Adroher X.C.** Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review. *Materials today* 32, 178–203 (2020).
- [30] **Pearman B.P. et al.** The chemical behavior and degradation mitigation effect of cerium oxide nanoparticles in perfluorosulfonic acid polymer electrolyte membranes. *Polymer degradation and stability* 98, 1766–1772 (2013).
- [31] **Miyatake K., Chikashige Y., Higuchi E., Watanabe M.** Tuned polymer electrolyte membranes based on aromatic polyethers for fuel cell applications. *Journal of the American Chemical Society* 129, 3879–3887 (2007).
- [32] **James B.D., Huya-Kouadio J.M., Houchins C., DeSantis D.A.** Mass production cost estimation of direct H<sub>2</sub> PEM fuel cell systems for transportation applications: 2012 update. report by Strategic Analysis, Inc., under Award Number DEEE0005236 for the US Department of Energy 18 (2012).
- [33] **Tanaka S., Shudo T.** Corrugated mesh flow channel and novel microporous layers for reducing flooding and resistance in gas diffusion layer-less polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 268, 183–193 (2014).
- [34] **Amamiya I., Tanaka S.** Current topics proposed by PEFC manufacturers, etc. – current status and topics of fuel cells for FCV. In *Hydrogen, Fuel Cell Project Evaluation, and Issue Sharing Week* (Japan New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019); available at <https://www.nedo.go.jp/content/100895101.pdf> (in Japanese).
- [35] **Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU).** 2019 annual work plan and budget (FCH 2 JU, 2018); [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/jtis/h2020-wp19-fch\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/jtis/h2020-wp19-fch_en.pdf).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ЦЗЯН Хецин** – руководитель группы мембранного разделения и катализа, Институт биоэнергетики и технологии биопроцессов Циндао, Китайская академия наук.

This article has been previously published. Citation link: H. Jiang Proton exchange membrane fuel cells. 4rd Annual Report of the Global Energy Association. pp. 83–90. The original full text of the report is available at the link: <https://globalenergyprize.org/en/2023/06/15/10-breakthrough-ideas-in-energy-for-the-next-10-years/>

*H. Jiang*

Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology,  
Chinese Academy of Science, Shandong, China

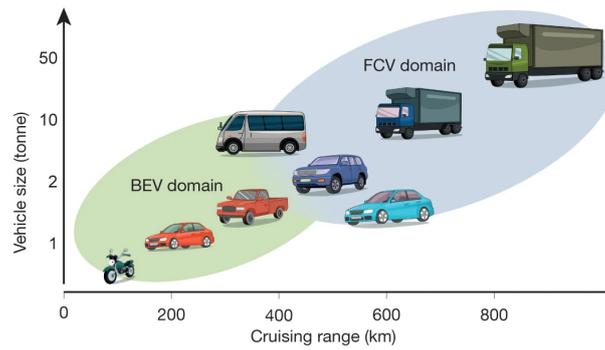
## PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS

**Introduction.** With the increased global energy consumption and environmental pollution, efforts are being made to find eco-friendly and renewable energy alternatives to decouple the energy demands from the carbon cycle. Due to its eco-friendliness and high weight-energy density, hydrogen is regarded as a non-polluting fuel and energy-storage medium for the future of energy [1]. In the hydrogen cycle, fuel cell vehicles are critical for converting hydrogen energy to electrical energy. Over conventional internal combustion engines used in many vehicles today, hydrogen fuel cells exhibit several attractive advantages such as higher efficiency, zero greenhouse gas emissions, pure water and heat as the only by-products, lower operating costs, and robust reliability [2]. These merits point to fuel cells as a promising energy conversion technology for our green future [3].

Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs), the most common type of fuel cells, can convert the chemical energy in fuels to electricity with efficiencies of at least 60%. As a versatile new-generation power generation technology, PEMFCs can operate at low temperatures (~80–120 °C), supplying electricity to transport vehicles and portable devices, as well as to large-scale stationary power systems. The electrochemical conversion of hydrogen in fuel cells produces no harmful emissions. When fed with hydrogen, the only by-productions of fuel cells are pure water and potentially useful heat; thus, no air pollutants that cause health problems or the greenhouse effect are emitted at the point of operation. Besides, fuel cells are quiet during operation, avoiding possible noise pollution.

Generally, fuel cells are often compared with batteries, as electric motors powered by batteries are a promising low-carbon transport route as well [4]. Figure 1 gives a good summary for comparison of their technical characteristics from Jiao et al. [5]. Fuel cells typically exhibit higher energy density than batteries due to the inherent property of the used fuel. During the refill process, fuel cells are able to take less time relative to batteries thanks to the faster hydrogen refueling. For fuel cells, the performance can be maintained under low temperature conditions, but a considerably decreased discharge capacity is generally observed on batteries. Concerning the costs, the situation becomes a bit complex. At the current cost levels of electricity and hydrogen, using batteries costs a bit less than that using fuel cells for short-range vehicles (< 200 miles, 322 km), but the costs become comparable for long-range vehicles (> 300 miles, 483 km) [6]. Therefore, based on their respective technical characteristics, fuel cells are currently more suitable for long-distance and heavy-duty transportation, whereas batteries have more competitive advantages for short-distance and light-duty transportation [5].

Fuel cells have high energy-convention efficiency, high power density, zero carbon footprints, and fast start-up, thus attracting rapidly growing attention. In the past several decades, PEMFCs have made significant progress on the development of fuel cell vehicles. Considering the performance, cost, and durability of current models, there are still gaps for PEMFCs in large-scale commercialization.



	BEV	FCV
<b>Storage media</b>	Li-ion batteries	Hydrogen
<b>Energy density</b>	<200 Wh kg <sup>-1</sup>	~300 Wh kg <sup>-1</sup>
<b>Refuelling time</b>	Hours	Minutes
<b>Low temperature</b>	Severe degradation	Demonstrated at -30 °C
<b>Efficiency</b>	~90%	~60%
<b>Infrastructure</b>	Grid and charging piles	Hydrogen stations

Fig. 1. Comparison of the application in future automotive transportation of fuel cell vehicles (FCVs) and battery electric vehicles (BEVs) and their technical characteristics

### PEMFC performance

PEMFCs use a solid polymer as an electrolyte and porous catalyst-loaded carbon as electrodes (Fig. 2a), which co-construct the core component – the membrane electrode assembly (MEA). The typical MEA comprises a proton-exchange membrane (PEM), catalyst layers (CL), and gas diffusion layers (GDL) with micropores. In PEMFCs, the PEM or polymer electrolyte membrane, currently perfluorosulfonic acid (PFSA)-based, functions as an electrical insulator, a proton conductor, and a gas separator. The CL, conventionally including platinum-loaded carbon finely dispersed within ionomers, is added on both sides of the proton-exchange membrane (Fig. 2a), where the oxygen reduction and hydrogen oxidation reactions occur. The GDLs, layers of carbon paper, locate outside the CLs, facilitating gas distribution and removal of product water as well as assisting mechanical support and electrical connection. A typical single PEMFC requires bipolar plates (BPs) to operate MEA effectively. The BPs, mostly made of carbon, metal, or composites, provide electrical conduction between cells and rigid supports for the stack, onto which flow fields of reactants and coolants are fabricated. These critical components in PEMFCs, their unique properties, and characteristics affect the overall performance, cost, and durability of PEMFCs.

PEMFCs work like batteries; however, they can produce heat and electricity as long as fuel is fed and do not require recharging compared to batteries. The MEA is the part of the fuel cell that produces power (Fig. 2b). Specifically, when hydrogen is supplied to the anode in a hydrogen fuel cell, catalysts located on the anodic CL decompose hydrogen molecules into electrons and protons. The electrons and protons then take different paths to the cathode. The electrons transport through an external circuit, inducing an electricity flow, and the protons migrate through the PEM to the catalysts on the cathodic CL, finally uniting with oxygen fed and the electrons to produce heat and water. The GDLs enable the balance between water release that keeps the pores open capable of fuel gas diffusion into the CLs and water retention that maintains membrane conductivity. Since a single fuel cell produces less than 1 V under typical operating

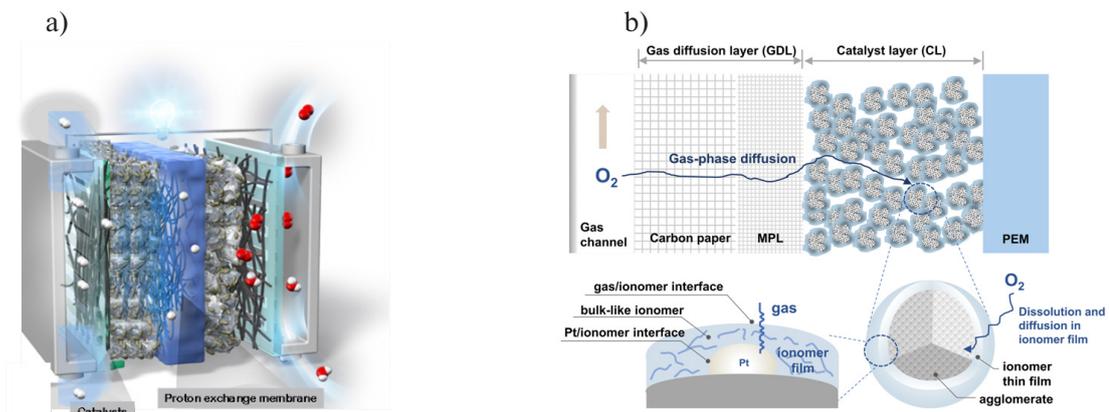


Fig. 2. Schematics of PEMFC (a) structure and (b) working principle

conditions that hardly meet most application requirements, the BPs connect multiple fuel cells in series and thus enable to provide a practical output voltage.

Impressive progress has been made to overcome the technical barriers of PEMFCs in the past decades. In terms of light-duty vehicles conditions, the advanced single fuel cells (total Pt loading  $0.175 \text{ mg cm}^{-2}$ , cathode Pt loading  $0.15 \text{ mg cm}^{-2}$ ) can maintain a power density as high as  $911 \text{ mW cm}^{-2}$  with a cell voltage of  $0.65 \text{ V}$  for 8,000 hrs [9]. The corresponding total stack cost decreased to about  $\$31/\text{kW}$  in 2022, reduced by  $\$8/\text{kW}$  compared to that in 2000, in which costs of catalysts and BPs accounted for the main part, 40% and 22%, respectively[9]. Toyota Mirai passenger fuel cell vehicle can be a benchmark for PEMFC development and innovation. In 2014, Toyota launched the first commercially mass-produced Mirai. Now the second-generation Mirai, launched at the end of 2020, enabled stack power densities with and without end plates,  $4.4 \text{ kW L}^{-1}$  and  $5.4 \text{ kW L}^{-1}$ , respectively, and achieved an increase of 42% and 54% compared to those in the first generation [10]. However, the retail price of Mirai is high to  $\$57,000$ , with only  $\sim 7,000$  leased or sold in the United States [11]. In contrast, the battery electric market has expanded massively over the past two decades thanks to the rapid lithium-ion battery technical development combined with grid at-home recharging. Accordingly, PEMFC electric vehicles are obviously in the early stages of commercialization. Their initial cost is not yet competitive, and current methods for reducing the cost can decrease the stack lifetime dramatically. Limited power density, cost parity with gasoline, and unsatisfied durability are crucial constraints for widespread PEMFC stack commercialization. Therefore, improving power density, lowering operation costs, and prolonging lifetime are vital for developing PEMFCs.

### PEMFC development

Tremendous scientific efforts have been made in designing the next generation of PEMFCs. In Fig. 3, the current potentials and challenges were well provided at the component level by Jiao et. al.[5]. The development direction of those components, including their interrelationship and design, determines the potential expectations and large-scale commercialization of PEMFCs.

**GDL** Carbon paper is the mainstream choice for commercialized PEMFCs, yet the gas permeation and water management related to its mass transfer are relatively slow, and the interfacial resistance, especially between the GDL and the BP, is much high. Structural modification has been certified as an effective approach, such as regulating GDL pore sizes [12] and laser perforation [13]. For example, GDLs with a sufficient gradient pore size, assisted by the carbon fiber arrangement, can reduce the contact resistance and facilitate water removal and reactant supply by establishing a more effective bridge between the MEA and the BP. More recently, a metal-sheet GDL was also proposed to reduce the contact resistance [14], but corruptions accompanied by the operation requires exploring new materials. Therefore till now, regulated carbon paper is still expected to function in future PEMFCs.

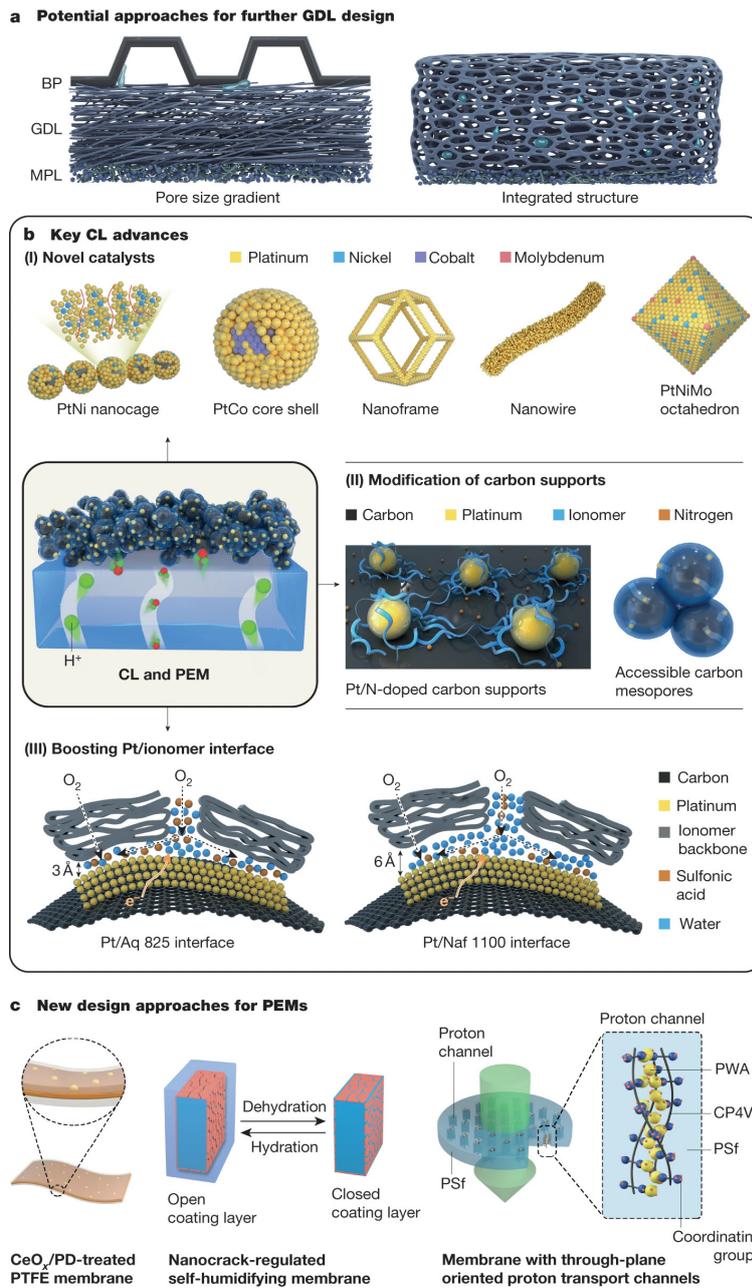


Fig. 3. State-of-the-art MEA designs. (a) Two promising design approaches for future GDL. (b) Important advances in CLs. (c) Recent approaches for PEM development

**CL** Both the main costs and the maximum power density are closely associated with catalysts on the CLs. Currently, platinum-loaded carbon, dispersed with ionomers, is mostly used due to its excellent durability and performance in an electrochemical environment. Three aspects have been considered to increase the performance and reduce the costs: decreasing the platinum group metal (PGM) loading, redesigning the ionomer, and ordering the MEA structure.

Three approaches are typically pursued for catalysts to lower the Pt utilization amount and enhance their performance and durability. One way is to alloy Pt nanoparticles with transition metal elements or lanthanides, such as Ni, Co, Cu, Pr [15, 16]. These introduced atoms alter the electronic properties of the catalyst surface and weaken the strong surface-intermediate interactions through a combination of strain and ligand effects, thus allowing the optimization of electron transfer [17]. A representative ex-

ample is Pt<sub>3</sub>Ni(111) with a Pt-rich outermost layer and a Ni-rich second atomic layer, which is 90-fold more active than the commercial Pt/C catalysts [18]. Another promising approach is the design of catalyst architectures, such as core-shell, nanocages, nanowires, nanoframes, nanocrystals [19]. As quantified by the generalized coordination number approach, hollow or coalescing Pt nanoparticles with rich concave sites enable significantly improved electrocatalysis kinetics [20]. Besides, developing platinum group metal-free catalysts is an alternative direction to address the high-cost issue fundamentally [8, 21, 22]. For example, transition metals combined with nitrogen co-doped carbons exhibit comparable oxygen reduction performance to state-of-the-art Pt/C catalysts under both half-cell and PEMFC operating conditions [23]. However, the inconsistent performance of catalysts in the half-cell and PEMFC tests, the fickleness of the nanoparticles, and unstable shape geometries all call for stabilizing active sites of catalysts to enhance the durability while maintaining the ultrahigh performance in a PEMFC operating environment [24].

Ionomers help deliver protons from and to the catalyst particles on CLs, and their distribution significantly affects the Pt catalyst utilization and ionic conductivity. Compared with the typical carbon black, nitrogen-doped carbon supports and carbon supports with a preferred internal pore are promising candidates that ensure more uniform coverage of the ionomer. For example, nitrogen-doped carbon supports promote the power densities of PEMFCs to 1,390 mW cm<sup>-2</sup> with a pure Pt catalyst [25]. Shortening the side-chain length of ionomers can also increase Pt utilization and enhance proton delivery [26]. However, concerning the water swelling/deswelling issues, highly stable ionomers with reliable water retention ability are still required in the future.

Order-structured MEAs provide efficient mass transport pathways that ensure a high reaction site exposure and Pt utilization. The 3M nanostructured thin film catalysts and carbon arrays in ionomers are both effective ways for constructing order-structured MEAs. The 3M nanostructured thin film CLs enable a power density as high as 1000 mW cm<sup>-2</sup> with an ultra-low Pt loading of 0.094 mg cm<sup>-2</sup> [27]. Order-structured MEA based on vertically aligned carbon nanotube arrays can also deliver a high power density, 1,560 mW cm<sup>-2</sup>, with a low cathode Pt loading (0.1 mg cm<sup>-2</sup>) [28]. Through those mentioned strategies on catalysts and CL architecture, it is expected that improvement in power, reduction in cost, and extension of PEMFC lifetime will be achieved.

**PEM** In order to expedite the application of PEMFCs, a new membrane with high proton conductivity, good electrochemical and mechanical stability, and low cost is desired for future PEMFCs. One main approach is to adjust the commercial perfluorosulfonic acid membranes. Reducing the membrane thickness can decrease the surface resistance, facilitating proton transfer and water transport, yet the electrochemical and mechanical stability are diminished. As an effective strategy, introducing PTFE into thin membranes can reinforce mechanical and dimensional stability. In addition, in the first-generation Mirai, a porous-medium flow field can be used to extend the mechanical support of the thin PEM [29]. Incorporating cerium salt into the membrane is also adapted in commercial practice to promote the stability of thin membranes. For example, despite membrane thickness being ~30% thinner, improved electrochemical and mechanical durability was achieved by introducing cerium salts into the membranes in the second-generation Mirai [30]. Finding new alternatives to perfluorosulfonic acid membranes is another promising approach. Among them, sulfonated hydrocarbon polymers are widely investigated due to their good thermal stability and proton conductivity [31]. Also, orienting proton-transport structures and incorporating ferrocyanide groups in membranes are expected to improve the property of membranes. Accordingly, it appears that perfluorosulfonic acid membranes seemingly will remain in play for about the next 10 years, but less expensive non-perfluorinated PEMs will gain more prominence.

**BP** The mass transport capacity of the PEMFC stack depends on the flow field design of BPs, and over 30% cost and 70% volume of the entire PEMFC stack is accounted for BPs. In order to promote

the mass transport ability of BPs, modifying the channel-rib structure and developing flow fields without ribs but with porous structures or micro bafflers have been mainly used. For example, baffles stamped in a fish-scale pattern used in the three-dimensional BP facilitated the mass transfer of the first-generation Mirai [32]. In terms of the cost and volume issues, the component integration provides a more compact cell structure. The complete removal of the GDL, namely an integrated BP-MEA structure, both significantly reduces PEMFCs volume and advantageously eliminates the interfacial transport of mass, heat, and electrons [33]. Besides, the durability of the BP is also a severe factor in practice that is influenced by electrochemical corrosion and mechanical degradation. Coating the BP with a passive layer, including the formation of low-resistance oxide films and corrosion-resistant coatings, can improve its long-term stability [32]. Precision and uniform manufacturing of currently used metal/carbon BPs and coatings are expected to facilitate PEMFC commercialization.

In short, for current key components in PEMFCs, establishing a refined, controllable, and easy-to-manufacture structural design is a crucial direction, while developing new materials promises to have far-reaching impacts on PEMFC final large-scale commercialization.

### Opportunities and challenge of PEMFCS

The hydrogen energy industry development, especially PEMFC technology innovation, has gradually attracted much attention from many countries worldwide, since it can accelerate energy upgrades, serve carbon neutrality, and promote economic growth. Local and national authorities have taken significant action to seize emerging opportunities. China, the largest hydrogen producer with an annual output of 33 million tonnes, released its first-ever national hydrogen strategy in March, in which more than 50,000 hydrogen fuel cell electric vehicles will run on the road in China by 2025. Many countries in European have enacted legislation to ban internal combustion engines in support of PEMFCs, and European Union plans to ban the sale of new combustion engine cars from 2035. The United States Department of Energy (DOE) has supported fuel cell-related research and development since the late 1970s. With support from the government and the industry, the PEMFC industry will develop rapidly in the future, similar to the development of the lithium-ion battery industry.

However, advanced technologies are still required to improve performance, reduce costs, and promote durability of PEMFCs for their large-scale commercialization. Associated research and development targets capable of this commercialization have been set by the various national authorities. According to the New Energy and Industrial Technology Development Organization of Japan,  $6.0 \text{ kW L}^{-1}$  and  $9.0 \text{ kW L}^{-1}$  are the power density targets of the fuel cell stack for automotive applications in 2030 and 2040, respectively [34]. The European Union Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (EU-FCH2JU) recently demonstrated that the power density goal of a PEMFC stack is  $9.3 \text{ kW L}^{-1}$  (with end plates) at a single-cell voltage of 0.6 V and a current density of  $2.67 \text{ A cm}^{-2}$  by 2024 [35]. The United States DOE set the cost goal of a PEMFC stack is \$40 per kilowatt under light-duty vehicles conditions in 2025 and \$60 per kilowatt under heavy-duty vehicles conditions in 2030 [9]. Nevertheless, those cost targets are hard to achieve under the current advanced stack model since the predictions are \$50 and \$145 per kilowatt, respectively [9]. Therefore, technological innovation is still required on those critical components to improve power densities, reduce costs, and increase the durability of PEMFCs.

### Conclusion

To sum up, we can conclude that the PEMFCs have evolved to the early stage of industrialization and commercialization, but there are still technical barriers that need to be overcome in critical components of PEMFCs. The performance, costs, and durability of PEMFCs are the three criteria for evaluating the properties and characteristics of these critical components. With policy support and technological advancement, the PEMFCs will be successfully commercialized under an efficient and effective regulatory framework in the future.

## REFERENCES

- [1] J.O.M. Bockris, A hydrogen economy. *Science* 176, 1323–1323 (1972).
- [2] **J. Fichtner, et al.**, Tailoring the oxygen reduction activity of Pt nanoparticles through surface defects: a simple top-down approach. *ACS catalysis* 10, 3131–3142 (2020).
- [3] **S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari**, Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 981–989 (2012).
- [4] **Z.P. Cano, et al.**, Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy* 3, 279–289 (2018).
- [5] **K. Jiao, et al.**, Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells. *Nature* 595, 361–369 (2021).
- [6] **O. Gröger, H.A. Gasteiger, J.-P. Suchsland**, Electromobility: Batteries or fuel cells? *Journal of The Electrochemical Society* 162, A2605 (2015).
- [7] **J. Miyake, et al.**, Rechargeable proton exchange membrane fuel cell containing an intrinsic hydrogen storage polymer. *Communications Chemistry* 3, 1–7 (2020).
- [8] **M. Tang, S. Zhang, S. Chen**, Pt utilization in proton exchange membrane fuel cells: structure impacting factors and mechanistic insights. *Chemical Society Reviews* (2022).
- [9] **B.D. James**, Fuel Cell Cost and Performance Analysis (2022 DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Annual Merit, 2022); [https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/fc353\\_james\\_2022\\_o.pdf](https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review22/fc353_james_2022_o.pdf)
- [10] Full specs of Toyota MIRAI 2021. Toyota USA [https://www.toyota.com/MIRAI/features/mileage\\_estimates/3002/3003](https://www.toyota.com/MIRAI/features/mileage_estimates/3002/3003) (2020).
- [11] **M. Shao, Q. Chang, J.-P. Dodelet, R. Chenitz**, Recent advances in electrocatalysts for oxygen reduction reaction. *Chemical reviews* 116, 3594–3657 (2016).
- [12] **M. Li, et al.**, Ultrafine jagged platinum nanowires enable ultrahigh mass activity for the oxygen reduction reaction. *Science* 354, 1414–1419 (2016).
- [13] **D. Gerteisen, C. Sadeler**, Stability and performance improvement of a polymer electrolyte membrane fuel cell stack by laser perforation of gas diffusion layers. *Journal of Power Sources* 195, 5252–5257 (2010).
- [14] **S. Tanaka, W.W. Bradfield, C. Legrand, A.G. Malan**, Numerical and experimental study of the effects of the electrical resistance and diffusivity under clamping pressure on the performance of a metallic gas-diffusion layer in polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 330, 273–284 (2016).
- [15] **M. Oezaslan, F. Hasché, P. Strasser**, PtCu<sub>3</sub>, PtCu and Pt<sub>3</sub>Cu alloy nanoparticle electrocatalysts for oxygen reduction reaction in alkaline and acidic media. *Journal of The Electrochemical Society* 159, B444 (2012).
- [16] **I.E. Stephens, A.S. Bondarenko, U. Grønbjerg, J. Rossmeisl, I. Chorkendorff**, Understanding the electrocatalysis of oxygen reduction on platinum and its alloys. *Energy & Environmental Science* 5, 6744–6762 (2012).
- [17] **J.R. Kitchin, J.K. Nørskov, M.A. Barteau, J. Chen**, Role of strain and ligand effects in the modification of the electronic and chemical properties of bimetallic surfaces. *Physical Review Letters* 93, 156801 (2004).
- [18] **V.R. Stamenkovic, et al.**, Improved oxygen reduction activity on Pt<sub>3</sub>Ni (111) via increased surface site availability. *Science* 315, 493–497 (2007).
- [19] **B. Garlyyev, et al.**, Optimizing the size of platinum nanoparticles for enhanced mass activity in the electrochemical oxygen reduction reaction. *Angewandte Chemie International Edition* 58, 9596–9600 (2019).
- [20] **F. Calle-Vallejo, et al.**, Finding optimal surface sites on heterogeneous catalysts by counting nearest neighbors. *Science* 350, 185–189 (2015).
- [21] **H. Gai, et al.**, Sandwich-like hierarchical porous dual-carbon catalyst with more accessible sites for boosting oxygen reduction reaction. *Materials Today Energy* 21, 100809 (2021).
- [22] **S. Xue, Y. Liang, S. Hou, Y. Zhang, H. Jiang**, Alpha-nickel hydroxide coating of metallic nickel for enhanced alkaline hydrogen evolution. *ChemSusChem* 15, e202201072 (2022).

- [23] X. Wan, et al., Fe–N–C electrocatalyst with dense active sites and efficient mass transport for high-performance proton exchange membrane fuel cells. *Nature Catalysis* 2, 259–268 (2019).
- [24] T. Lazaridis, B.M. Stühmeier, H.A. Gasteiger, H.A. El-Sayed, Capabilities and limitations of rotating disk electrodes versus membrane electrode assemblies in the investigation of electrocatalysts. *Nature Catalysis* 5, 363–373 (2022).
- [25] S. Ott, et al., Ionomer distribution control in porous carbon-supported catalyst layers for high-power and low Pt-loaded proton exchange membrane fuel cells. *Nature materials* 19, 77–85 (2020).
- [26] S. Poojary, M.N. Islam, U.N. Shrivastava, E.P. Roberts, K. Karan, Transport and electrochemical interface properties of ionomers in Low-Pt loading catalyst layers: effect of ionomer equivalent weight and relative humidity. *Molecules* 25, 3387 (2020).
- [27] T. Crowtz, J.R. Dahn, Screening bifunctional Pt based NSTF catalysts for durability with the rotating disk electrode: The effect of Ir and Ru. *Journal of The Electrochemical Society* 165, F854 (2018).
- [28] S. Murata, M. Imanishi, S. Hasegawa, R. Namba, Vertically aligned carbon nanotube electrodes for high current density operating proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 253, 104–113 (2014).
- [29] Y. Wang, D.F.R. Diaz, K.S. Chen, Z. Wang, X.C. Adroher, Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells—a review. *Materials today* 32, 178–203 (2020).
- [30] B.P. Pearman, et al., The chemical behavior and degradation mitigation effect of cerium oxide nanoparticles in perfluorosulfonic acid polymer electrolyte membranes. *Polymer degradation and stability* 98, 1766–1772 (2013).
- [31] K. Miyatake, Y. Chikashige, E. Higuchi, M. Watanabe, Tuned polymer electrolyte membranes based on aromatic polyethers for fuel cell applications. *Journal of the American Chemical Society* 129, 3879–3887 (2007).
- [32] B.D. James, J.M. Huya-Kouadio, C. Houchins, D.A. DeSantis, Mass production cost estimation of direct H<sub>2</sub> PEM fuel cell systems for transportation applications: 2012 update. report by Strategic Analysis, Inc., under Award Number DEEE0005236 for the US Department of Energy 18 (2012).
- [33] S. Tanaka, T. Shudo, Corrugated mesh flow channel and novel microporous layers for reducing flooding and resistance in gas diffusion layer-less polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 268, 183–193 (2014).
- [34] I. Amamiya, S. Tanaka, Current topics proposed by PEFC manufacturers, etc. – current status and topics of fuel cells for FCV. In *Hydrogen, Fuel Cell Project Evaluation, and Issue Sharing Week* (Japan New Energy and Industrial Technology Development Organization, 2019); available at <https://www.nedo.go.jp/content/100895101.pdf> (in Japanese).
- [35] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (FCH 2 JU). 2019 annual work plan and budget (FCH 2 JU, 2018); [https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/jtis/h2020-wp19-fch\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/jtis/h2020-wp19-fch_en.pdf)

## INFORMATION ABOUT AUTHOR

**Heqing JIANG** – *Leader of Membrane Separation & Catalysis Group, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Science.*

# Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.512.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>



С.С. Бусаров  , Р.Э. Кобыльский

Омский государственный технический университет,  
г. Омск, Россия

 [bssi1980@mail.ru](mailto:bssi1980@mail.ru)

## **СОЗДАНИЕ ПОРШНЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ РАБОТЫ ДЛЯ БЕССМАЗОЧНЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТИХОХОДНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

*Аннотация.* В проведённой работе, посвященной совершенствованию рабочего процесса бессмазочных малорасходных тихоходных длинноходовых поршневых компрессоров среднего и высокого давления, проведены экспериментальные исследования, позволившие обосновать минимальное количество используемых манжетных уплотнений для обеспечения коэффициента подачи не менее 70%. Таким образом, для создания энергоэффективной машины необходимое число уплотнений равно семи. Проведён анализ повышения ресурса манжетных уплотнений, позволивший дать практические рекомендации по проектированию тихоходных поршневых компрессоров. Так, для обеспечения ресурса в 100 000 часов необходимо четырнадцать манжет, постепенный износ которых обеспечит и ресурс с требуемым уровнем коэффициента подачи. Дальнейшее повышение ресурса возможно при увеличении количества уплотнений, однако это приведёт и к росту габаритов компрессорной ступени.

*Ключевые слова:* тихоходный компрессор, ресурс, манжетные уплотнения, коэффициент подачи, эффективность рабочего процесса.

*Для цитирования:*

Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э. Создание поршневых уплотнений с повышенным ресурсом работы для бессмазочных малорасходных тихоходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>*S.S. Busarov* ✉, *R.E. Kobilskiy*

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

✉ [bssi1980@mail.ru](mailto:ssi1980@mail.ru)

## DESIGN OF PISTON SEALS WITH INCREASED SERVICE LIFE FOR LUBRICATION-FREE LOW-FLOW LOW-SPEED RECIPROCATING COMPRESSORS OF MEDIUM AND HIGH PRESSURE

*Abstract.* Within the research devoted to improving the workflow of lubrication-free low-flow low-speed long-stroke piston compressors of medium and high pressure, we carried out experimental studies, which made it possible to substantiate the minimum number of cuff seals used to ensure a feed rate of at least 70%. To create an energy efficient machine, the required number of seals is seven. We analyzed the increase in the service life of cuff seals, which made it possible to give practical recommendations for the design of low-speed reciprocating compressors. Thus, to provide a service life of 100,000 hours, fourteen cuffs are needed: their gradual wear also provides a service life with the required level of feed rate. A further increase in the service life is possible with an increase in the number of seals, but this would increase the dimensions of the compressor stage as well.

*Keywords:* low-speed compressor, service life, lip seals, feed rate, workflow efficiency.

*Citation:*

S.S. Busarov, R.E. Kobilskiy, Design of piston seals with increased service life for lubrication-free low-flow low-speed reciprocating compressors of medium and high pressure, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 24–30, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29301>

**Введение.** Современные малорасходные бесшмазочные поршневые компрессоры нашли широкое применение в таких областях как медицина, приборостроение, низкотемпературные системы за счёт своей компактности, возможности подачи чистого газа [1, 2].

В настоящее время актуальной задачей является производство компрессоров для автономных условий эксплуатации таких как труднодоступные районы Арктики и Антарктики, пустыни, горные районы, в транспортных установках морского, подводного, наземного и космического базирования, для которых время автономной эксплуатации нередко доходит до 30 000 ч, а в некоторых случаях и более [3, 4].

Одним из функциональных элементов компрессоров, препятствующих длительной эксплуатации, являются цилиндропоршневые уплотнения. Современные уплотнения позволяют проработать без замены от 5 000 до 20 000 ч, что не соответствует современным требованиям [5, 6].

Современным направлением повышения эффективности компрессоров среднего и высокого давления можно считать создание тихоходных поршневых компрессоров, способных в одной ступени сжатия повышать давление в 100 ... 120 раз при допустимых температурах сжимаемого газа. Достигается это за счёт сочетания конструктивных и режимных параметров, которое не нашло отражение в существующих технологиях получения среднего и высокого давления. Такие компрессоры обладают низкой скоростью движения поршня – не более 0,5 м/с при диаметрах цилиндров – 0,02...0,08 м имеют относительно большой ход –  $S/D$  более 10. Это позволяет при наличии внешнего интенсивного охлаждения поршневой ступени хорошо охлаждать газ, добываясь “квазиизотермического” сжатия и минимизировать влияние мёртвого объёма [7–12].

Таким образом уникальное сочетание режимных и конструктивных параметров в тихоходных поршневых компрессорах предположительно позволит значительно повысить ресурс цилиндро-поршневых уплотнений.

Ранее были проведены исследования по определению максимальной толщины изнашиваемой части манжеты [13].

На основании износа при условиях работы характерных для режимов эксплуатации тихоходных поршневых компрессоров были получены результаты для одного уплотнения, выполненного из материалов Флубон 20 и Флувиз 20 – 40 000 ... 60 000 ч.

В данном исследовании необходимо определить минимальное количество манжет, позволяющее работать тихоходному поршневому компрессору с коэффициентом подачи не менее 0,7 при давлении нагнетания до 12 МПа и возможность дальнейшего повышения ресурса.

#### Объект исследования

Объектом исследования являются манжетное цилиндропоршневое уплотнение высотой – 0,005 м, номинальным диаметром – 0,05 м, угол раскрытия кромки лепестка – 115°. Параметры тихоходной ступени – диаметр цилиндра – 0,05 м; ход поршня – 0,5 м; граничные условия – температура газа на всасывании – 293 К, давления всасывания – 0,1 МПа, давление нагнетания 1 – 12 МПа, сжимаемый газ – воздух.

#### Методика проведения исследования

При проведении экспериментальных исследований использовалась глухая камера сжатия без клапанов для исключения влияния других неплотностей рабочей камеры кроме неплотностей в цилиндропоршневом уплотнении.

Фотография экспериментального стенда представлена на рис. 1. Эксперимент проводился следующим образом: сжатие в рабочей камере 2 происходит за счёт работы гидравлического привода и передачи движения от гидроцилиндра 1, изменение давления и температуры газа в рабочей камере фиксируются датчиком давления 3 и датчиком температуры 4, сигнал визуализируется на цифровом осциллографе, значения параметров получают на основании ранее проведённых тарировок датчиков.

При проведении экспериментов увеличивается количество манжет до режимов, при которых давление практически перестаёт расти в камере сжатия.

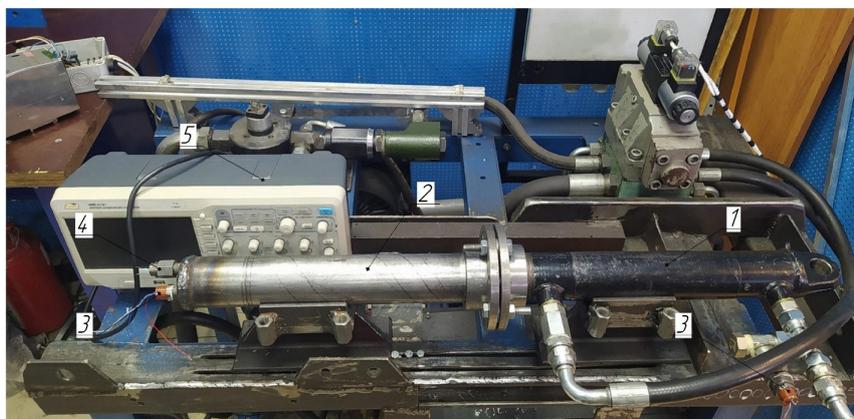


Рис. 1. Фотография экспериментального стенда: 1 – Гидроцилиндр, 2 – Рабочая камера, 3 – Датчик давления, 4 – Датчик температуры, 5 – Цифровой осциллограф

Fig. 1. Photo of the experimental stand: 1 – Hydraulic cylinder, 2 – Working chamber, 3 – Pressure sensor, 4 – Temperature sensor, 5 – Digital oscilloscope

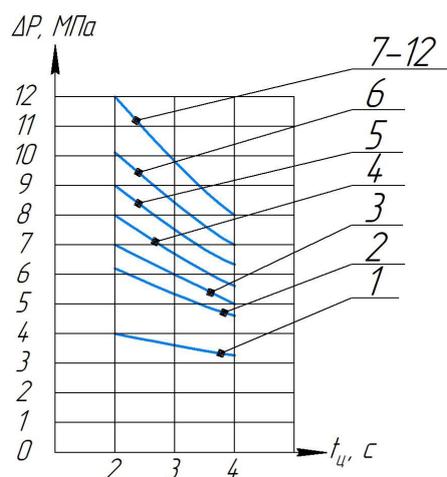


Рис. 2. График зависимости воспринимаемой поршнем разности давлений от времени рабочего цикла: номера кривых – число уплотнений

Fig. 2. Graph of the dependence of the pressure difference in the piston on the time of the working cycle: curve numbers show the number of seals

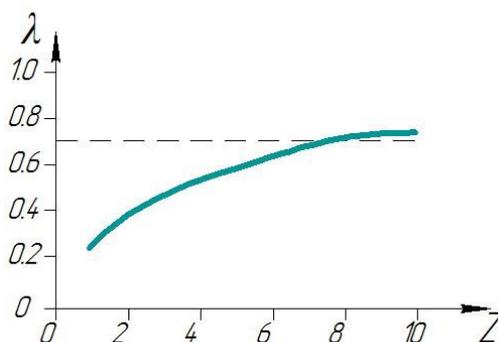


Рис. 3. Зависимость коэффициента подачи от количества манжет при  $P_{н} = 10$  МПа и  $\tau = 4$  с

Fig. 3. Dependence of the feed rate on the number of cuffs at  $P_{dis} = 10$  MPa and  $\tau = 4$  s

Полученные графики изменения максимального давления при различном времени цикла с постепенно увеличенным количеством манжет.

Последний график с количеством манжет 7–12 показывает наибольшее полученное давление, причем значение получаемого давления не зависит от дальнейшего повышения количества манжет. Таким образом в тихоходной ступени нет необходимости устанавливать более 7 манжет для получения давления 12 МПа.

Данный эксперимент был повторен на макетном образце тихоходного компрессора по методике согласно ранее опубликованным работам [14]. На рис. 3 представлены результаты проведенных исследований – зависимость коэффициента подачи от количества установленных манжетных уплотнений.

### Результаты

Таким образом для обеспечения работы тихоходного компрессора с коэффициентом подачи не менее 0,7 необходимо установка 7 манжетных уплотнений, при этом ресурс работы составит до 60 000 ч. При износе первого манжетного уплотнения коэффициент подачи снизится, что по принятому критерию работоспособности будет означать неэффективную работу компрессора.

Для увеличения ресурса тихоходного компрессора необходимо увеличить количество манжетных уплотнений. На основании данных по воспринимаемым перепадам давлений каждого из уплотнений [15] можно определить величину пакета манжетных уплотнений. Так, например, для реализации ресурса в 100 000 ч уже необходимо уставка 14 уплотнений.

### Заключение

Проведённые исследования позволили получить рекомендации для проектирования цилиндропоршневых уплотнений тихоходных длинноходовых компрессоров. Минимальное количество манжетных уплотнений для тихоходных компрессоров среднего и высокого давления должно составлять не менее семи, ресурс работы при этом составляет до 60 000 часов с коэффициентом подачи не менее 0,7. Увеличение ресурса до 100 000 часов приведёт к необходимости использования уплотнения содержащего четырнадцать манжет.

Разработанная методика теоретически может дать рекомендации по конструкции уплотнения тихоходных компрессоров для получения заданного ресурса.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Юша В.Л., Громов А.Ю., Ушаков П.В. Анализ влияния температурных режимов поршневой длинноходовой компрессорной ступени на термодинамическую эффективность теплового насоса // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 1. С. 18–25. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25>

[2] Ramchandran G.T., Harrison J.A. Thermodynamic Chamber Modelling Approach for Oil Free and Oil Injected Twin Screw Compressors // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1180. 012160. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012160

[3] Юша В.Л., Бусаров С.С. Методика расчёта действительной производительности одноступенчатых длинноходовых поршневых компрессоров // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, №. 4. С. 9–15. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-9-15

[4] Байков И.Р., Китаев С.В., Файрушин Ш.З. Диагностирование технического состояния поршневых компрессоров // ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ № 3 (63). 2015. С. 28–30.

[5] Захаренко В.П., Захаренко А.В. Отечественные инновационные разработки для решения задач повышения технического уровня импортозамещения в иностранных поршневых компрессорах // Низкотемпературная техника и системы низкопотенциальной энергетики. 2015. Т. 1, № 1. С. 19–24.

[6] Новиков И.И. Бессмазочные поршневые уплотнения в компрессорах / И.И. Новиков, В.П. Захаренко, Б.С. Ландо; под общ. ред. И.И. Новикова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. – 238 с.: ил.

[7] Бусаров С.С., Юша В.Л. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 80–89.

[8] Бусаров С.С. Эволюция конструкций тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней и актуальность их развития // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 12. – С. 464–469. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-464-469

[9] Бусаров С.С., Кобыльский Р.Э., Громов А.Ю. Методика расчета толщины стенки лепестка манжетного цилиндропоршневого уплотнения // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 1. С. 26–31. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-26-31

- [10] **Yusha V.L., Busarov S.S., Gromov A.Yu.** Assessment of the prospects of development of medium-pressure single-stage piston compressor units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53 (3). DOI: 10.1007/s10556-017-0362-2
- [11] **Nedovenchanyi A.V.** The application of compact thermistors for the temperature conditions analysis of small-sized long-stroke low-speed stages of piston compressors / A.V. Nedovenchanyi, S.S. Busarov, A.Yu. Gromov, R.Yu. Goshlya, I.S. Busarov // *Procedia Eng.* – 2016. – Vol. 152. – P. 281–287.
- [12] **Yusha V.L., Busarov S.S., Nedovenchanyi A.V.** Analysis of the operating cycle efficiency of the long-stroke slow stage under the changing ratio of the piston forward and backward stroke time // *AIP Conf. Proc.* – 2018. – Vol. 2007. – P.030058-1–030058-5.
- [13] **Yusha V.L., Busarov S.S., Goshlya R.Yu., Nedovenchanyi A.V., Sazhin B.S., Chizhikov M.A., Busarov I.S.** The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor, *International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2016.* – p. 297–302.
- [14] **Nedovenchanyi A.V., Yusha V.L., Busarov S.S.** Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low speed reciprocating compressor stages in compression of different gases // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54. P. 593–597. DOI: 10.1007/s10556-018-0520-1
- [15] **Бусаров С.С., Недовенчаный А.В., Кобыльский Р.Э., Синицин Н.Г., Муслова Л.А.** Верификация нагрузки, действующей на манжетное цилиндропоршневое уплотнения, работающего без смазки // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2021. – Вып. 10. – С. 658–667. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-658-667

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БУСАРОВ Сергей Сергеевич** – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.  
E-mail: bssi1980@mail.ru

**КОБЫЛЬСКИЙ Роман Эдуардович** – ассистент, Омский государственный технический университет, без степени.  
E-mail: roman.kobilsky@gmail.com

#### REFERENCES

- [1] **V.L. Yusha, A.Yu. Gromov, P.V. Ushakov,** Analiz vliyaniya temperaturnykh rezhimov porshnevoy dlinnokhodovoy kompressornoy stupeni na termodinamicheskuyu effektivnost teplovogo nasosa // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye*. 2023. T. 7, № 1. S. 18–25. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2023-7-1-18-25>
- [2] **G.T. Ramchandran, J.A. Harrison,** Thermodynamic Chamber Modelling Approach for Oil Free and Oil Injected Twin Screw Compressors // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1180. 012160. DOI: 10.1088/1757-899X/1180/1/012160
- [3] **V.L. Yusha, S.S. Busarov,** Metodika rascheta deystvitelnoy proizvoditelnosti odnostupenchatykh dlinnokhodovykh porshnevnykh kompressorov // *Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye*. 2020. T. 4, No. 4. S. 9–15. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-9-15
- [4] **I.R. Baykov, C.B. Kitayev, Sh.Z. Fayrushin,** Diagnostirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevnykh kompressorov // *DIAGNOSTIKA I NADEZH NOST ENERGOBORUDOVANIYa* № 3 (63). 2015. S. 28–30.

[5] **V.P. Zakharenko, A.V. Zakharenko**, Otechestvennyye innovatsionnyye razrabotki dlya resheniya zadach povysheniya tekhnicheskogo urovnya importozameshcheniya v inostrannykh porshnevnykh kompressora // Nizkotemperaturnaya tekhnika i sistemy nizkopotentsialnoy energetiki. 2015. T. 1, № 1. S. 19–24.

[6] **I.I. Novikov**, Bessmazochnyye porshnevyye uplotneniya v kompressorakh / I.I. Novikov, V.P. Zakharenko, B.S. Lando; pod obshch. red. I.I. Novikova. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye, 1981. – 238 s.: il.

[7] **S.S. Busarov, V.L. Yusha**, Perspektivy sozdaniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov srednego i vysokogo davleniya na baze unifitsirovannykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh stupeney // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24, № 4. S. 80–89.

[8] **S.S. Busarov**, Evolyutsiya konstruktivnykh tikhokhodnykh dlinnokhodovykh kompressornykh stupeney i aktualnost ikh razvitiya // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2021. – Vyp. 12. – S. 464–469. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-464-469

[9] **S.S. Busarov, R.E. Kobylskiy, A.Yu. Gromov**, Metodika rascheta tolshchiny stenki lepesta manzhetnogo tsilindroporshnevoogo uplotneniya // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2023. T. 7, № 1. S. 26–31. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-1-26-31

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

[11] **A.V. Nedovenchanyi**, The application of compact thermistors for the temperature conditions analysis of small-sized long-stroke low-speed stages of piston compressors / A.V. Nedovenchanyi, S.S. Busarov, A.Yu. Gromov, R.Yu. Goshlya, I.S. Busarov // Procedia Eng. – 2016. – Vol. 152. – R. 281–287.

[12] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyi**, Analysis of the operating cycle efficiency of the long-stroke slow stage under the changing ratio of the piston forward and backward stroke time // AIP Conf. Proc. – 2018. – Vol. 2007. – P.030058-1–030058-5.

[13] **V.L. Yusha, S.S. Busarov, R.Yu. Goshlya, A.V. Nedovenchanyi, B.S. Sazhin, M.A. Chizhikov, I.S. Busarov**, The experimental research of the thermal conditions in slow speed stage of air reciprocating compressor, International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE-2016. – p. 297–302.

[14] **A.V. Nedovenchanyi, V.L. Yusha, S.S. Busarov**, Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low speed reciprocating compressor stages in compression of different gases // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54. R. 593–597. DOI: 10.1007/s10556-018-0520-1

[15] **S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyi, R.E. Kobylskiy, N.G. Sinitsin, L.A. Muslova**, Verifikatsiya nagruzki, deystvuyushchey na manzhetnoye tsilindroporshnevoye uplotneniya, rabotayushchego bez smazki // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. – 2021. – Vyp. 10. – S. 658–667. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-658-667

## INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Sergey S. BUSAROV** – *Omsk State Technical University*.  
E-mail: bssi1980@mail.ru

**Roman E. KOBILSKIY** – *Omsk State Technical University*.  
E-mail: roman.kobilsky@gmail.com

Поступила: 28.03.2023; Одобрена: 02.06.2023; Принята: 14.06.2023.  
Submitted: 28.03.2023; Approved: 02.06.2023; Accepted: 14.06.2023.

Научная статья

УДК 621.315.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29302>



А.М. Гулов  , А.В. Колычев

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

 [algu1ov@yandex.ru](mailto:algu1ov@yandex.ru)

## МОДЕЛЬ ОПОРЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ЗАДАЧАХ МОЛНИЕЗАЩИТЫ

*Аннотация.* Удар молнии в вершину опоры или в трос вблизи опоры приводит к возникновению опасных перенапряжений, которые могут привести к обратному перекрытию с опоры на фазный провод. Обратные перекрытия являются одной из причин отключения линии. Поэтому для анализа переходных процессов в опоре во время грозовых перенапряжений разработаны и продолжают разрабатываться различные модели опоры ВЛ. В работе проводится сравнение нескольких моделей опор применительно к расчету молниезащиты двухцепной ВЛ 110 кВ. Рассмотрены наиболее распространенные в отечественной практике модели опоры из набора индуктивностей рассчитанные по формулам РД, с усредненными значениями индуктивностей, а также модель из волновых сопротивлений и ее упрощенная версия. С помощью схемы участка ВЛ 110 кВ в ЕМТР-АТР рассчитаны кривые опасных токов для нескольких видов модели опоры. В ходе расчетов варьируется сопротивление заземления опор, чтобы изучить влияние падения напряжения на сопротивлении заземления опоры в сочетании с разными моделями опоры.

*Ключевые слова:* воздушная линия, молниезащита, модель опоры, перенапряжения, сопротивление заземления опоры.

*Для цитирования:*

Гулов А.М., Колычев А.В. Модель опоры воздушной линии электропередачи в задачах молниезащиты // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 31–42. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29302>



A.M. Gulov ✉, A.V. Kolychev

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

✉ [algu1ov@yandex.ru](mailto:algu1ov@yandex.ru)

## OVERHEAD LINE TOWER MODEL IN TASKS OF LIGHTNING PROTECTION

*Abstract.* A lightning strike at the top of the tower results in dangerous overvoltages, which can lead to back flashover from the tower to the phase wire. Back flashovers are one of the reasons for the transmission line outage. Therefore, various models of overhead line tower have been developed and continue to be developed to analyze transient processes in the tower during lightning overvoltages. Several tower models were compared to calculate the lightning protection of a double-circuit 110 kV overhead line. In Russia, the most common tower model is a set of inductances, while foreign countries employ tower models from surge impedances: the article compares both models. Curves of critical lightning current for several types of tower models are calculated for 110 kV overhead line in EMTP-ATP. The tower footing resistance varies to study the effect of voltage drop at the tower.

*Keywords:* transmission line, lightning protection, tower model, overvoltages, tower footing resistance.

*Citation:*

A.M. Gulov, A.V. Kolychev, Overhead line tower model in tasks of lightning protection, Global Energy, 29 (03) (2023) 31–42, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29302>

**Введение.** В вопросах координации изоляции и молниезащиты важным аспектом является моделирование опор воздушной линии электропередачи. Вследствие удара молнии в вершину опоры или в трос вблизи опоры возникают опасные перенапряжения, которые могут привести к обратному перекрытию с опоры на фазный провод. Обратные перекрытия являются предметом изучения ученых-энергетиков [1–3] так как это одна из причин отключения воздушных линий. С начала прошлого века было разработано большое количество моделей для анализа переходных процессов в опоре во время грозových перенапряжений [4]. Зарубежом в расчетах молниезащиты ВЛ принято использовать модели опоры, выполненные с помощью волновых сопротивлений [5, 6]. В отечественной практике наибольшей популярностью пользуется методика РД<sup>1</sup>, в которой опора представляется в виде индуктивности [7]. Интересно будет сравнить и проанализировать разные подходы к моделированию опоры на примере расчета молниезащиты двухцепной воздушной линии 110 кВ.

### Модели опоры воздушной линии

Согласно РД, тело опоры замещается сосредоточенной индуктивностью и вычисляется следующим образом:

$$L_{on} = k \cdot h_{on}, \quad (1)$$

где  $h_{on}$  – высота опоры до точки подвеса троса (на линиях с тросом) или до вершины опоры (для ВЛ без троса), м;  $k$  – коэффициент, который зависит от типа опоры и выбирается по табл. П16.1 РД, мкГн/м. Стоит заметить, что формула (1) справедлива для опор высотой до 50 м.

Для точных расчетов грозовых перенапряжений при ударе молнии в ВЛ важно учитывать перекрытия изоляционных подвесок. Поэтому представление опоры в виде сосредоточенной индуктивности не является верным решением. Опору можно представить в виде набора индуктивностей, т. е. разбить на несколько частей (от основания до первой траверсы, от первой траверсы до второй траверсы и т. д.). В этом случае параметр  $h_{op}$  в (1) замещается на длину участка опоры. Такая схема замещения учитывает индуктивности между траверсами, т. е. траверсы имеют разный потенциал.

Другим распространенным методом моделирования опоры ВЛ является представление ее в виде волнового сопротивления. Подробный обзор различных моделей опоры ВЛ приведен в [4]. Многообразие подходов по моделированию опор можно разделить на несколько групп.

В первую группу входят подходы с использованием упрощенной геометрии опоры. Опору целиком представляют в виде цилиндра или конуса и заменяют одним волновым сопротивлением [8]. Данный тип моделей также, как и опору в виде сосредоточенной индуктивности, целесообразно применять для приближенной оценки грозовых перенапряжений на ВЛ.

Ко второй группе относятся модели, состоящие из нескольких секций. В этих моделях тело опоры разделено на несколько волновых сопротивлений, в зависимости от геометрии. Существуют модели в которых также учитывается влияние траверс и раскосов [9].

Разработаны модели опоры, где к волновому сопротивлению каждой секции последовательно подключается параллельная RL цепь [10]. Сопротивление представляет собой коэффициент затухания бегущих волн в опоре, а индуктивность позволяет более точно аппроксимировать характеристику хвоста волны [10]. Эта индуктивность является параметром, определяющим форму хвоста волны, и не имеет ничего общего с сосредоточенной индуктивностью, которая часто используется для моделирования самой опоры [10].

Такая модель была получена на основе результатов полевых измерений на реальных опорах. Значения волнового сопротивления опоры и коэффициентов затухания определяются подбором так, чтобы полученная модель соответствовала измерениям. Поэтому существуют ограничения в применении модели к другим типам опор ЛЭП [10].

Работы по созданию оптимальной модели опоры ВЛ продолжаются. Например в [11] предлагается новая модель, полученная при помощи аппроксимации геометрии опоры тонким проводом с дальнейшим расчетом в программном комплексе NEC-4 (Numerical Electromagnetic Code). В [12] предлагается новая модель, в которой может учитываться разница напряжений в зависимости от стороны удара молнии, что влияет на развитие обратных перекрытий.

Для расчета грозовых перенапряжений на ВЛ 110 кВ воспользуемся моделью, приведенной в [9], эта модель часто используется в расчетах молниезащиты ВЛ [13, 14]. В [15] показана хорошая сходимость между измеренными значениями волнового сопротивления и полученными по методике [9] (средняя разница 5,3%). Волновое сопротивление в [9] описывается эмпирической формулой:

$$Z_T = 60 \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot h}{r} \right) - 2, \quad (2)$$

где  $h$  и  $r$  это высота и радиус цилиндра соответственно.

Опору представляют в виде многопроводниковой системы, т. е.  $r$  в (2) заменяется на эквивалентный радиус многопроводниковой системы, который описывается формулами:

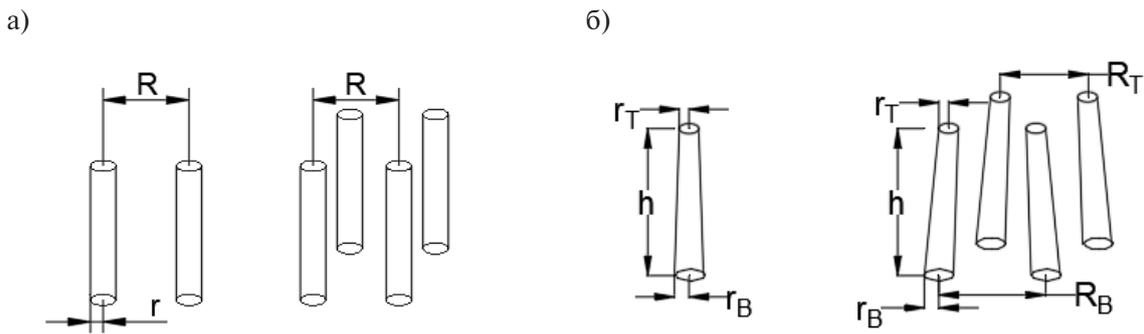


Рис. 1. Многопроводниковые системы: конфигурации многопроводниковой системы (а) и система проводников с наклоном (б)

Fig. 1. Multiconductor systems: configurations of multiconductor systems (a) and slant conductor system (b)

$$r_e = \begin{cases} r^{1/2} \cdot R^{1/2} & (n = 2) \\ r^{1/3} \cdot R^{2/3} & (n = 3), \\ 2^{1/8} \cdot r^{1/4} \cdot R^{3/4} & (n = 4) \end{cases} \quad (3)$$

где  $n$  – количество проводников,  $r$  – радиус проводника,  $R$  – расстояние между проводниками (см. рис. 1 а).

При помощи измерений авторы [9] подтвердили пригодность применения формулы (2) для многопроводниковой системы приведенной на рис. 1 б.

Радиус проводника и расстояние между проводниками в данной конфигурации заменяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} r &= r_T^{1/3} \cdot r_B^{2/3}, \\ R &= R_T^{1/3} \cdot R_B^{2/3}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $r_T$  и  $r_B$  это радиусы верха и низа цилиндра,  $R_T$  и  $R_B$  это расстояние между двумя соседними цилиндрами сверху и снизу соответственно.

Приведенные формулы применяются для опор, состоящих из цилиндрических компонентов. В случае, когда опора конструируется из уголков,  $r_T$  и  $r_B$  заменяются на половину длины стороны уголка [9].

На рис. 2 приведена геометрия опоры П-110-4 с обозначением требуемых для расчета величин.

Таким образом волновое сопротивление основных секций опоры рассчитывается по формуле:

$$Z_T = 60 \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot h_k}{r_{ek}} \right) - 2 \quad (k = 1, 2, 3, 4), \quad (5)$$

где  $r_{ek}$

$$r_{ek} = 2^{1/8} \cdot (r_{Tk}^{1/3} \cdot r_B^{2/3})^{1/4} \cdot (R_{Tk}^{1/3} \cdot R_B^{2/3})^{3/4} \quad (k = 1, 2, 3, 4). \quad (6)$$

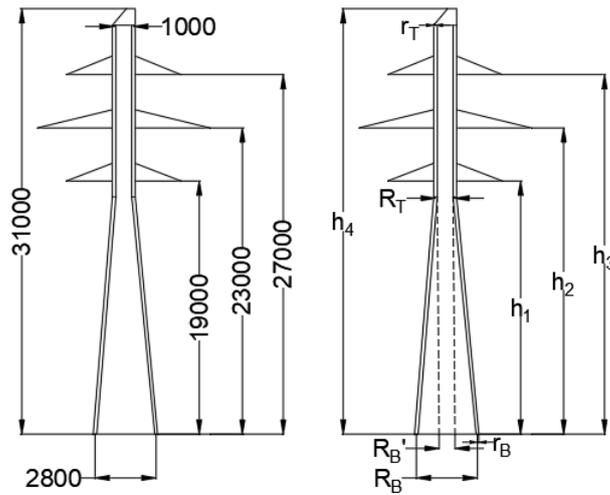


Рис. 2. Эскиз опоры П-110-4  
Fig. 2. Scheme of 110 kV tower

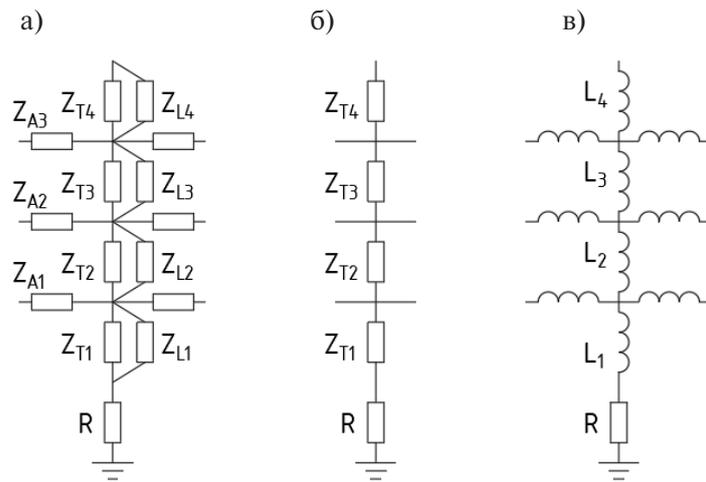


Рис. 3. Модели опоры: полная модель по [9] (а), упрощенная модель (б), модель из индуктивностей (в)  
Fig. 3. Tower models: complete model based on [9] (a), simplified model (b), inductances model (c)

Данные для расчета соответствуют рис. 3 и равны реальным размерам опоры.

В [9] также предлагается учитывать волновое сопротивление раскосов опоры. По результатам измерений авторами [9] было установлено, что волновое сопротивление проводников снижается примерно на 10% за счет добавления раскосов к основным поясам опоры. В модель сопротивления раскосов добавляются как параллельные элементы основным сопротивлениям секций опоры и рассчитываются по формуле:

$$Z_{Lk} = 9 \cdot Z_{Tk} \quad (k = 1, 2, 3, 4). \quad (7)$$

Длина раскосов упрощенно принимается как 1,5 длины секции опоры. Волновое сопротивление траверс в [9] рассчитывается как сопротивление горизонтально расположенных проводников.

$$Z_{Ak} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h_k}{r_{Ak}} Z_{Tk} \quad (k = 1, 2, 3, 4), \quad (8)$$

где  $h$  и  $r_A$  это высота и эквивалентный радиус траверсы соответственно.

Скорость распространения волны примем равной скорости света, так как в [9] показано, что форма волны напряжения полученная экспериментальным путем лучше совпадает с напряжением рассчитанным при скорости распространения волны равной скорости света, чем при скорости равной 80 % от скорости света.

В результате расчета опоры П-110-4 получены следующие значения волновых сопротивлений:

$Z_{T1} = 129 \text{ Ом}; Z_{T2} = 176 \text{ Ом}; Z_{T3} = 185 \text{ Ом};$

$Z_{T4} = 194 \text{ Ом}; Z_{A1} = 286 \text{ Ом}; Z_{A2} = 297 \text{ Ом}; Z_{A3} = 307 \text{ Ом}; Z_{L1} = 1161 \text{ Ом};$

$Z_{L2} = 1584 \text{ Ом}; Z_{L3} = 1665 \text{ Ом}; Z_{L4} = 1746 \text{ Ом}.$

В [9] приводятся расчеты, доказывающие важность учета сопротивления траверс, однако авторами рассматривается опора 500 кВ с траверсами длиной более 10 метров. В случае же промежуточной опоры 110 кВ длина траверсы составляет 2–4 метра. Существуют определенные трудности при расчете схемы с короткими участками в программном комплексе ЕМТР-АТР, когда размеры расчетной модели не позволяют задать требуемый достаточно мелкий шаг расчета по времени. Поэтому далее будет также рассмотрена упрощенная модель опоры без учета волновых сопротивлений траверс.

### Результаты

Необходимо провести сравнение моделей опор, чтобы выяснить наиболее подходящую для исследования молниезащиты ВЛ. Будем сравнивать три модели: из волновых сопротивлений по методике [9] (рис. 3 а), упрощенный вариант из [9] без учета траверс и раскосов (рис. 3 б), из набора индуктивностей (рис. 3 в).

На рис. 4 приведены осциллограммы напряжения на тросостойке для различных конфигураций модели опоры из волновых сопротивлений.

Присутствие в модели сопротивления раскосов дает снижение максимального напряжения, что подтверждает приведенное в [9] описание данной модели. Таким образом видно, что наличие волновых сопротивлений траверс оказывает влияние на форму напряжения, в то время как дополнительные сопротивления раскосов влияют в основном на величину напряжения.

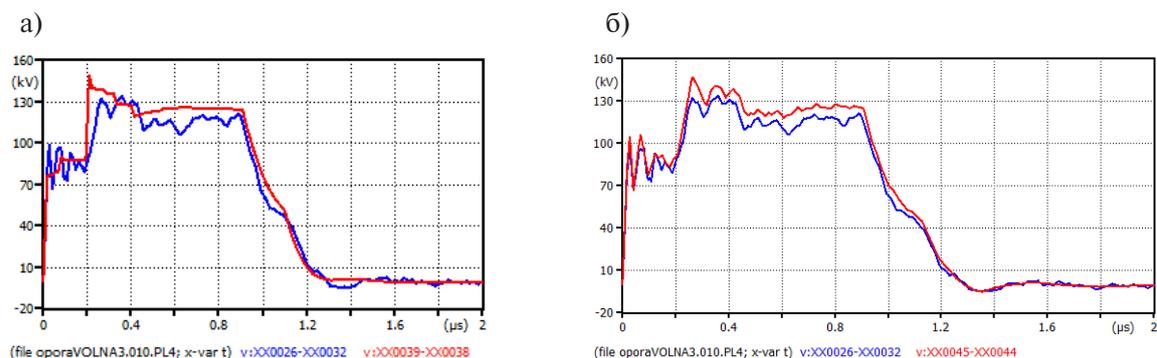


Рис. 4. Напряжение на тросостойке. Импульс тока молнии 1/100 мкс амплитудой 50 кА, сопротивление ЗУ опоры 10 Ом. Синим — полная модель (а, б), красным — упрощенная модель без траверс и раскосов (а) и упрощенная модель с траверсами, но без раскосов (б)

Fig. 4. Voltage on the ground wire support. The impulse of lightning current is 1/100 μs with an amplitude of 50 kA, the tower footing resistance is 10 Ohms. Blue line is for complete model (a, b), red line for simplified model with no traverses or braces (a) and simplified model with traverses but no braces (b)

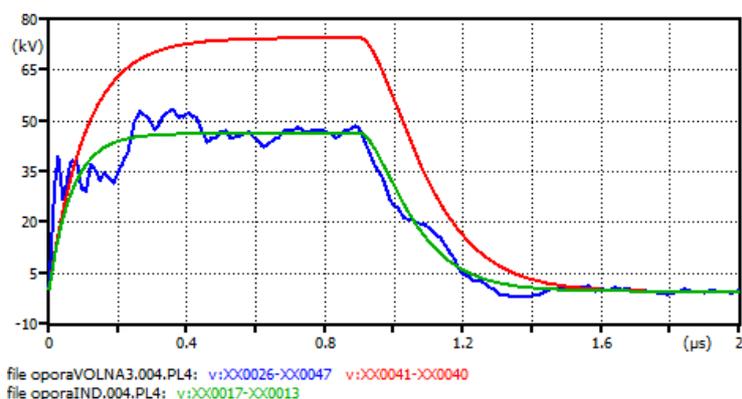


Рис. 5. Напряжение на тросостойке. Импульс 1/100 мкс амплитудой 20 кА, сопротивление ЗУ опоры 10 Ом. Синим – полная модель из волновых сопротивлений, красным – модель из набора индуктивностей по РД, зеленым – модель из набора индуктивностей с усредненным значением

Fig. 5. Voltage on the ground wire support. The impulse of lightning current is 1/100  $\mu\text{s}$  with an amplitude of 20 kA, the tower footing resistance is 10 Ohms. Blue is a complete model of surge impedances, red is a model from a set of inductances according to RD (Guidelines), green is a model from a set of average value inductances

Сравним теперь полную модель опоры из волновых сопротивлений с моделью из набора индуктивностей. Согласно РД, коэффициент  $k$  в формуле (1) для одностоечной металлической опоры П-110-4 равен 0,965 мкГн/м.

В то же время в книге «Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения»<sup>2</sup> приводят усредненное значение коэффициента  $k$  для одностоечных металлических опор равное 0,6 мкГн/м. На рис. 5 приведены осциллограммы напряжений как для опоры из индуктивностей, рассчитанных с использованием коэффициента  $k$  равного 0,965 мкГн/м, так и для усредненного значения коэффициента  $k$ .

Как видно из рис. 5 осциллограмма напряжения по модели с применением усредненного коэффициента  $k$  лучше совпадает с осциллограммой напряжения, полученной на модели из волновых сопротивлений. Наибольшее значение напряжения на  $Z_{T4}$  (см. рис. 3 а) достигает 53 кВ, в то время как на  $L_4$  (см. рис. 3 в) оно составляет 46,4 и 74,5 кВ для коэффициента  $k$  равного 0,6 и 0,965 мкГн/м соответственно.

На нижней стойке напряжение на индуктивности  $L_1$  больше, чем на волновом сопротивлении  $Z_{T1}$ . Наибольшее значение напряжения на  $Z_{T1}$  достигает 200 кВ, в то время как на  $L_1$  оно составляет 220 и 353 кВ для коэффициента  $k$  равного 0,6 и 0,965 мкГн/м соответственно. Таким образом можно сказать, что результаты расчета напряжения показывают неплохую сходимость для опор смоделированных по формулам из [9] и книги «Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения», в то время как результаты полученные по формулам из РД значительно отличаются в большую сторону.

Чтобы оценить влияние модели опоры на расчеты молниезащиты ВЛ рассчитаем кривые опасных токов (КОТ) для одноцепных отключений для 4 схем со следующими видами моделей опоры: 1) Полная модель опоры из волновых сопротивлений; 2) Упрощенная модель из волновых сопротивлений без траверс и раскосов; 3) Модель из индуктивностей, рассчитанных с коэффициентом  $k = 0,6$  мкГн/м; 4) Модель из индуктивностей, рассчитанных с коэффициентом  $k = 0,965$  мкГн/м. Молнии, у которых сочетание амплитуды  $I_M$  и крутизны  $I'_M$  импульса тока молнии дает точку, расположенную выше кривой опасных токов, способны вызвать перекрытие изоляции при ударе в вершину опоры, точки, расположенные ниже КОТ, не приводят к перекрытию изоляции. Таким

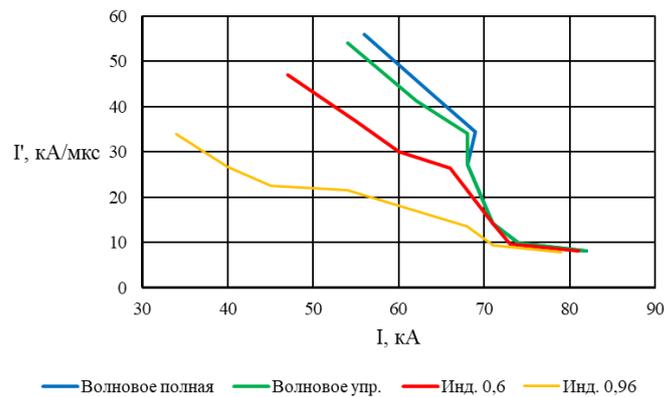


Рис. 6. Кривые опасных токов молнии. Сопротивление ЗУ опоры 10 Ом  
 Fig. 6. Curves of critical lightning currents for tower footing resistance of 10 Ohms

образом, КОТ является границей области опасных параметров молнии в координатах  $I_M, I'_M$ .

При ударе молнии в вершину опоры на вершине опоры создается потенциал, вызванный падением напряжения на сопротивлении заземления, падением напряжения на теле опоры, а также наведенной электромагнитной составляющей за счет магнитной индукции между телом опоры и каналом молнии:

$$U_{\text{оп}} = U_R + U_{Z/L} + U_{\text{м-оп}} \cdot \quad (9)$$

Напряжение на гирлянде равно разности напряжений на опоре и фазном проводе. Обратное перекрытие изоляции происходит, когда напряжение на гирлянде превышает ее импульсную прочность.

При изменении модели опоры будет изменяться падение напряжения на теле опоры  $U_{Z/L}$ , при этом необходимо оценить влияние падения напряжения на сопротивлении заземления опоры  $U_R$  в сочетании с разными моделями опоры. Для этого рассчитаем КОТ варьируя сочетание модель опоры-сопротивление заземления. В каждом случае сопротивление заземления всех опор в расчетной схеме принимается одинаковым и равным: 10 Ом, 30 Ом, 50 Ом. Фронт импульса тока молнии варьируется в диапазоне 1–10 мкс.

На рис. 6 приведены КОТ для сопротивления заземления опор 10 Ом. Наибольшая разница между границами КОТ наблюдается при коротких фронтах импульса 1–5 мкс. При фронте 10 мкс границы КОТ практически совпадают. Худший случай получается при использовании модели опоры из индуктивностей по РД, так как потенциал на элементах опоры в такой модели наибольший. Разница между полной и упрощенной моделями с волновыми сопротивлениями минимальна. Таким образом использование моделей из набора индуктивностей дает более высокую вероятность отключения ВЛ.

При увеличении сопротивления заземления опор до 30 Ом получим КОТ на рис. 7, где видно, что из-за увеличения влияния составляющей напряжения  $U_R$  в формуле (9) различия в КОТ полученных на разных моделях опоры сокращается. При фронте импульса тока молнии 2,5 мкс и более КОТ для всех моделей и вовсе совпадают. Разница в границах КОТ между полной и упрощенной моделями с волновыми сопротивлениями отсутствует.

При увеличении сопротивления заземления опор до 50 Ом получим КОТ на рис. 8, где видно, что разница между границами КОТ остается только для модели опоры из индуктивностей по формулам РД. Расхождение получается только для фронта тока молнии 1 мкс.

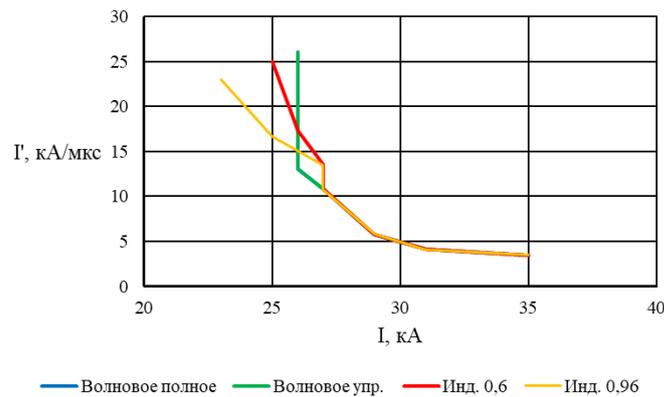


Рис. 7. Кривые опасных токов молнии. Сопротивление ЗУ опоры 30 Ом  
 Fig. 7. Curves of critical lightning currents for tower footing resistance of 30 Ohms

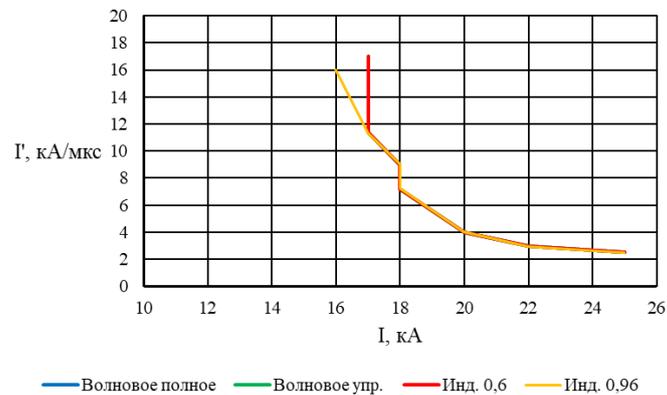


Рис. 8. Кривые опасных токов молнии. Сопротивление ЗУ опоры 50 Ом  
 Fig. 8. Curves of critical lightning currents for tower footing resistance of 50 Ohms

### Выводы

При расчете обратных перекрытий при ударе молнии в вершину опоры вид модели опоры вносит наибольший вклад при малом сопротивлении ЗУ опор. С увеличением сопротивления заземления опор разница между КОТ для разных моделей опор уменьшается и при 50 Ом практически отсутствует. При сопротивлении заземления опор 10 Ом использование моделей из индуктивностей даст более высокие показатели при расчете количества отключений ВЛ. Худший случай получается при вычислении индуктивности опоры по формулам из РД. При увеличении сопротивления заземления опор до 30 Ом КОТ для разных моделей не совпадают при коротких фронтах до 2,5 мкс, при дальнейшем увеличении фронта импульса тока молнии отличий для разных моделей опор не наблюдается.

Длина фронта импульса тока молнии также оказывает заметное влияние на границу КОТ для разных моделей опор. Так при коротких фронтах раньше происходит перекрытие на опоре из индуктивностей. При увеличении длины фронта тока молнии границы КОТ сближаются для разных моделей опоры даже при малом сопротивлении ЗУ опор 10 Ом.

При упрощении модели опоры из волновых сопротивлений (когда из схемы удаляются элементы замещающие траверсы и раскосы) значительной разницы с полной моделью в границах

КОТ не наблюдается. Таким образом, если размеры расчетной схемы в ЕМТР-АТР не позволяют ввести достаточно мелкий шаг расчета по времени, чтобы учитывать короткие участки волнового сопротивления (траверсы), то от них можно отказаться.

При расчете молниезащиты ВЛ, проходящей в местности с высокоомными грунтами, принципиальной разницы между разными моделями опоры нет. В случае низкоомных грунтов лучше использовать в расчетах модель опоры из волновых сопротивлений или из индуктивностей с усредненным значением индуктивности опоры на единицу длины так как использование модели опоры, рассчитанной по формулам из РД, даст значительно большую вероятность одноцепных отключений ВЛ.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Silveira F.H., Visacro S.** Lightning Performance of Transmission Lines: Impact of Current Waveform and Front-Time on Backflashover Occurrence // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019. № 6 (34). С. 2145–2151. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2897892
- [2] **Silveira F.H., Almeida F.S., Visacro S., Zago G.M.P.** Influence of the current front time representation on the assessment of backflashover occurrence of transmission lines by deterministic and probabilistic calculation approaches // *Electric Power Systems Research*. 2021. № May (197). DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107299
- [3] **Silveira F.H., Visacro S., Souza R.E.** Lightning performance of transmission lines: Assessing the quality of traditional methodologies to determine backflashover rate of transmission lines taking as reference results provided by an advanced approach // *Electric Power Systems Research*. 2017. № 2016 (153). С. 60–65. DOI: 10.1016/j.epsr.2017.01.005
- [4] **Stracqualursi E., Pelliccione G., Celozzi S., Araneo R.** Tower Models for Power Systems Transients: A Review // *Energies*. 2022. № 13 (15). С. 1–40. DOI: 10.3390/en15134893
- [5] **Khodsuz M.** Externally gapped line arrester performance in high voltage transmission line using frequency grounding system: Absorbed energy and expected life assessment // *IET Science, Measurement and Technology*. 2022. № 7 (16). С. 426–440. DOI: 10.1049/smt2.12116
- [6] **Nor Hassan N.H., Abu Bakar A.H., Illias H.A., Abd Halim S., Mokhlis H., Terzija V.** Analysis of discharge energy on surge arrester configurations in 132 kV double circuit transmission lines // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2019. (139). С. 103–111. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.02.088
- [7] **Матвеев Д.А., Гилязов М.З.** Подход к численному моделированию в воздушных линиях электропередачи 110–750 кВ с подвесными ограничителями перенапряжения // *Энергетик*. 2011. (12). С. 12–15.
- [8] **De Conti A., Visacro S., Soares A., Schroeder M.A.O.** Revision, extension, and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2006. № 3 (48). С. 530–536. DOI: 10.1109/TEMC.2006.879345
- [9] **Hara T., Yamamoto O.** Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis // *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*. 1996. № 3 (143). С. 283–289. DOI: 10.1049/ip-gtd:19960289
- [10] **Ishii M., Kawamura T., Kouno T., Murotani K., Ohsaki E., Higuchi T.** Multistory transmission tower model for lightning surge analysis 1991. № 3 (6). С. 1327–1335.
- [11] **Salarieh B., De Silva H.M.J., Gole A.M., Ametani A., Kordi B.** An electromagnetic model for the calculation of tower surge impedance based on thin wire approximation // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. № 2 (36). С. 1173–1182. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3003250
- [12] **Yamanaka A., Nagaoka N., Baba Y.** Equivalent Circuit Model of a Transmission Tower Considering a Lightning Struck Point and Cross-arms // *Electric Power Systems Research*. 2021. № November 2020 (196). С. 1–7. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107253

[13] **Li H., Xiang N., Bao H., Jin M., Ding L.** Lightning protection performance of quadruple-circuit 500 kV transmission lines on the same tower with composite cross arm // *Energy Reports*. 2022. (8). С. 520–526. DOI: 10.1016/j.egyр.2021.11.162

[14] **Zhou L., Wu T., Wang D., Hu C., Chen S.** Research on Optimal Configuration of Line Lightning Arrester Considering Terrain and Flashover Cost // 2021 IEEE 2<sup>nd</sup> China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021. 2021. С. 1–5. DOI: 10.1109/CIYCEE53554.2021.9676873

[15] **Ametani A., Triruttanapiruk N., Yamamoto K., Baba Y., Rachidi F.** Impedance and Admittance Formulas for a Multistair Model of Transmission Towers // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2020. № 6 (62). С. 2491–2502. DOI: 10.1109/TEMC.2020.2976644

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГУЛОВ Александр Михайлович** – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: [algu1ov@yandex.ru](mailto:algu1ov@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6107-277X>

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

E-mail: [alkoly4ev@yandex.ru](mailto:alkoly4ev@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0803-9121>

### REFERENCES

[1] **F.H. Silveira, S. Visacro,** Lightning Performance of Transmission Lines: Impact of Current Waveform and Front-Time on Backflashover Occurrence // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019. № 6 (34). S. 2145–2151. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2897892

[2] **F.H. Silveira, F.S. Almeida, S. Visacro, G.M.P. Zago,** Influence of the current front time representation on the assessment of backflashover occurrence of transmission lines by deterministic and probabilistic calculation approaches // *Electric Power Systems Research*. 2021. № May (197). DOI: 10.1016/j.epсr.2021.107299

[3] **F.H. Silveira, S. Visacro, R.E. Souza,** Lightning performance of transmission lines: Assessing the quality of traditional methodologies to determine backflashover rate of transmission lines taking as reference results provided by an advanced approach // *Electric Power Systems Research*. 2017. № 2016 (153). S. 60–65. DOI: 10.1016/j.epсr.2017.01.005

[4] **E. Stracqualursi, G. Pelliccione, S. Celozzi, R. Araneo,** Tower Models for Power Systems Transients: A Review // *Energies*. 2022. № 13 (15). S. 1–40. DOI: 10.3390/en15134893

[5] **M. Khodsuz,** Externally gapped line arrester performance in high voltage transmission line using frequency grounding system: Absorbed energy and expected life assessment // *IET Science, Measurement and Technology*. 2022. № 7 (16). S. 426–440. DOI: 10.1049/smt2.12116

[6] **N.H. Nor Hassan, A.H. Abu Bakar, H.A. Ilias, S. Abd Halim, H. Mokhlis, V. Terzija,** Analysis of discharge energy on surge arrester configurations in 132 kV double circuit transmission lines // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2019. (139). S. 103–111. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.02.088

[7] **D.A. Matveyev, M.Z. Gilyazov,** Podkhod k chislenному modelirovaniyu v vozdushnykh liniyakh elektropredachi 110–750 kV s podvesnymi ogranichitelyami perenapryazheniya (An approach to numerical modeling of lightning overvoltages in 110–750 kV overhead power lines with surge arresters) // *Energetik*. 2011. (12). S. 12–15.

- [8] **A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, M.A.O. Schroeder**, Revision, extension, and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2006. № 3 (48). S. 530–536. DOI: 10.1109/TEMC.2006.879345
- [9] **T. Hara, O. Yamamoto**, Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis // IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution. 1996. № 3 (143). S. 283–289. DOI: 10.1049/ip-gtd:19960289
- [10] **M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, K. Murotani, E. Ohsaki, T. Higuchi**, Multistory transmission tower model for lightning surge analysis 1991. № 3 (6). S. 1327–1335.
- [11] **B. Salarieh, H.M.J. De Silva, A.M. Gole, A. Ametani, B. Kordi**, An electromagnetic model for the calculation of tower surge impedance based on thin wire approximation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. № 2 (36). S. 1173–1182. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3003250
- [12] **A. Yamanaka, N. Nagaoka, Y. Baba**, Equivalent Circuit Model of a Transmission Tower Considering a Lightning Struck Point and Cross-arms // Electric Power Systems Research. 2021. № November 2020 (196). S. 1–7. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107253
- [13] **H. Li, N. Xiang, H. Bao, M. Jin, L. Ding**, Lightning protection performance of quadruple-circuit 500 kV transmission lines on the same tower with composite cross arm // Energy Reports. 2022. (8). S. 520–526. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.11.162
- [14] **L. Zhou, T. Wu, D. Wang, C. Hu, S. Chen**, Research on Optimal Configuration of Line Lightning Arrester Considering Terrain and Flashover Cost // 2021 IEEE 2<sup>nd</sup> China International Youth Conference on Electrical Engineering, CIYCEE 2021. 2021. S. 1–5. DOI: 10.1109/CIYCEE53554.2021.9676873
- [15] **A. Ametani, N. Triruttanapiruk, K. Yamamoto, Y. Baba, F. Rachidi**, Impedance and Admittance Formulas for a Multistair Model of Transmission Towers // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2020. № 6 (62). S. 2491–2502. DOI: 10.1109/TEMC.2020.2976644

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Alexander M. GULOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: [algu1ov@yandex.ru](mailto:algu1ov@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6107-277X>

**Alexander V. KOLYCHEV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: [alkoly4ev@yandex.ru](mailto:alkoly4ev@yandex.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0803-9121>

Поступила: 18.05.2023; Одобрена: 24.06.2023; Принята: 06.07.2023.  
Submitted: 18.05.2023; Approved: 24.06.2023; Accepted: 06.07.2023.

Научная статья

УДК 621.316.727

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29303>



А.А. Завалов<sup>1</sup> ✉, И.С. Кузьмин<sup>2</sup>, В.С. Куликовский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия;

<sup>2</sup> ООО ГК «Рутас», г. Красноярск, Россия

✉ [zavalovartem@mail.ru](mailto:zavalovartem@mail.ru)

## ВЛИЯНИЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЙТРАЛЬНОГО ПРОВОДА В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СЕТЯХ ГОРОДОВ

*Аннотация.* Использование современных однофазных бытовых электроприборов и оргтехники приводит к значительному потреблению реактивной мощности электропотребителями городов. Неравномерная нагрузка по фазам в городских четырёх- и пятипроводных электрических сетях до 1000 В создаёт условия для термического разрушения нейтрального провода из-за протекания в нём токов близких по значению или превышающих токи в фазах. Для обоснования рациональной системы компенсации реактивной мощности необходимо провести анализ электропотребления городских электропотребителей, а для подтверждения актуальности задачи снижения тока в нейтральном проводе сети проанализировать аварийность городских электрических сетей до 1000 В. Решением задачи исключения условий для термического разрушения нейтрального провода может являться реконструкция городских кабельных линий с целью замены на линии с большим сечением нейтрального провода. Однако данное решение является весьма трудоёмким и дорогостоящим. Целью данного исследования является определение возможности снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений с помощью эффективной компенсации реактивной мощности.

*Ключевые слова:* неравномерная и несимметричная нагрузка, отгорание нейтрального провода, компенсация реактивной мощности, компьютерное моделирование, Matlab/Simulink, системы электроснабжения городов.

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (проект № 18261ГУ/2022)

*Для цитирования:*

Завалов А.А., Кузьмин И.С., Куликовский В.С. Влияние компенсации реактивной мощности на термическую устойчивость нейтрального провода в низковольтных сетях городов // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29303>



A.A. Zavalov<sup>1</sup> ✉, I.S. Kuzmin<sup>2</sup>, V.S. Kulikovskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

<sup>2</sup> LLC GC "Rutas", Krasnoyarsk, Russia

✉ zavalovartem@mail.ru

## INFLUENCE OF REACTIVE POWER COMPENSATION ON THERMAL STABILITY OF NEUTRAL WIRE IN LOW VOLTAGE CITY NETWORKS

*Abstract.* The use of modern single-phase household electrical appliances and office equipment leads to significant reactive power consumption by power consumers of cities. Unbalanced load by phases in urban four- and five-wire electrical networks up to 1000 V creates conditions for thermal destruction of neutral wire due to the flow of currents close in value or exceeding currents in phases. To justify a rational reactive power compensation system, it is necessary to analyze the electrical consumption of urban power consumers. To confirm the relevance of current reducing task in neutral wire of network, it is necessary to analyze accident rate of urban electrical networks up to 1000 V. Solution to the problem of eliminating conditions for thermal destruction of neutral wire can be the reconstruction of urban cable lines in order to replace them with lines with a large neutral wire section. However, this solution is very labor intensive and expensive. The purpose of this study is to determine whether it is possible to reduce current in neutral wire to acceptable continuous values using effective reactive power compensation.

*Keywords:* uneven and unbalanced load, neutral wire burnout, reactive power compensation, computer simulation, Matlab/Simulink, urban power supply systems.

*Acknowledgements:* The study was financially supported by the Innovation Promotion Fund (Project No. 18261GU/2022)

*Citation:*

A.A. Zavalov, I.S. Kuzmin, V.S. Kulikovskiy, Influence of reactive power compensation on thermal stability of neutral wire in low voltage city networks, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 43–56, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29303>

**Введение.** Низковольтные системы электроснабжения городов России являются трёхфазными четырёх или пятипроводными.

В городской среде, как правило, используются однофазные электроприборы, имеющие активно-индуктивный характер нагрузки и подключенные между фазой и нейтральным проводом [1–4]. Это обуславливает несимметричный и неравномерный характер распределения нагрузки по фазам и высокий уровень потребления реактивной мощности (РМ) электропотребителями городов.

Неравномерная нагрузка в трёхфазных четырёх и пятипроводных электрических сетях приводит к протеканию значительных токов в нейтральном проводе близких или превышающих по значению токи в фазах, что при определённых обстоятельствах создаёт условия для его термического разрушения [5–8].

Наиболее остро данная проблема стоит для кабельных линий (КЛ) городов, выполненных по стандартам советского времени с заниженным сечением нейтрального провода по сравнению с сечением фазных проводов, которые и в настоящее время находятся в эксплуатации [9–11].

Термическое разрушение нейтрального провода при неравномерной нагрузке по фазам приводит к перекосу фазных напряжений, что, в свою очередь, может явиться причиной массового выхода из строя используемого электрооборудования [12, 13].

Целью настоящего исследования является определение закономерностей изменения тока в нейтральном проводе КЛ в зависимости от неравномерности активной и реактивной нагрузок по фазам сети, а также изучение возможности снижения тока в нейтральном проводе с помощью компенсации реактивной мощности (КРМ) до допустимых длительных значений.

Для достижения поставленной цели необходимо изучить электропотребление электропотребителей, подключенных к городским распределительным сетям до 1000 В, и провести анализ аварийности данных сетей. На основе математического моделирования необходимо исследовать влияние разных видов КРМ на величину снижения тока в нейтральном проводе КЛ.

#### **Анализ электропотребления городских электропотребителей и аварийности городских электрических сетей до 1000 В**

Электропотребление городских электропотребителей было изучено на примере города Дудинки, расположенного в одном из северных регионов России, в системе электроснабжения которого эксплуатируются КЛ с заниженным сечением нейтрального провода по сравнению с сечением фазных проводов. Для этого использовались следующие приборы: прибор комплексного контроля ПКК-57 и анализатор качества электрической энергии модели Metrel MI 2292.

Изучалось электропотребление следующих типов электропотребителей: школы, детские сады, учреждения средне-специального образования, административные здания, торгово-развлекательные и спортивные сооружения, жилые дома.

Фиксировались и рассчитывались следующие величины: ток в фазах сети, фазное и линейное напряжение, активная, реактивная и полная мощность, коэффициент мощности и коэффициент РМ в определённые промежутки времени суток.

Уровень неравномерности нагрузки по отдельным фазам сети определялся на основе коэффициентов неравномерности потребления активной и реактивной мощности.

Величина коэффициента неравномерности потребления активной мощности определялась следующим выражением:

$$\gamma = \frac{P_{\max}}{P_{\min}}, \quad (1)$$

где  $P_{\max}$  — максимальное значение активной мощности в одной из фаз сети,  $P_{\min}$  — минимальное значение активной мощности в одной из фаз сети.

Величина коэффициента неравномерности потребления РМ определялась следующим выражением:

$$\delta = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}, \quad (2)$$

где  $Q_{\max}$  — максимальное значение РМ в одной из фаз сети,  $Q_{\min}$  — минимальное значение РМ в одной из фаз сети.

Предельные значения коэффициента РМ, потребляемой в часы больших и малых суточных нагрузок электрической сети определяет приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. № 380. Так для электрических сетей до 1000 В предельное значение коэффициента РМ в часы больших суточных нагрузок устанавливается равным 0,35, а в часы малых суточных нагрузок равным 0.

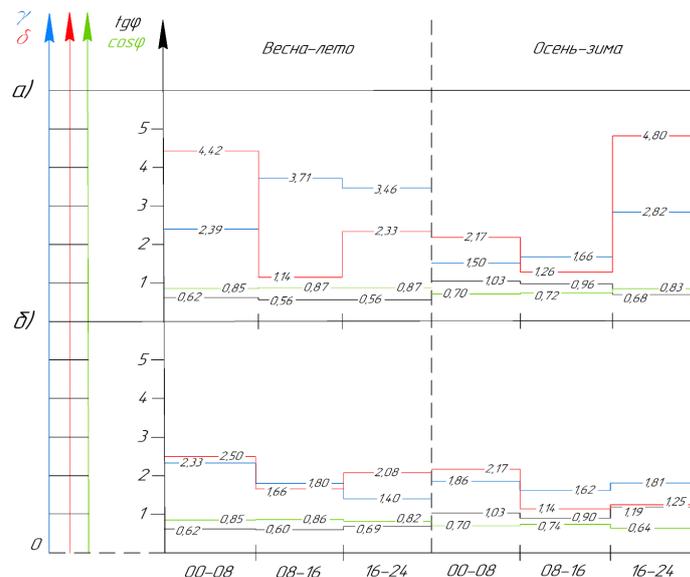


Рис. 1. График изменения  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\operatorname{tg}\varphi$  для а) школы №4 (силовая часть), б) школы №4 (освещение)  
 Fig. 1. Schedule of changes in  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\operatorname{tg}\varphi$  for а) school No. 4 (power equipment), б) school No. 4 (lighting)

Анализ электропотребления городскими электропотребителями показал, что зафиксированные значения коэффициента РМ превышают нормируемые для всех исследованных объектов. При этом, как правило, зафиксированные значения превышают нормируемые как в часы малых суточных нагрузок, так и в часы больших суточных нагрузок, а значения коэффициента РМ в зимний период года превышают значения в летний период. Также было отмечено, что количество подъездов и этажность не оказывают существенного влияния на изменение коэффициента РМ у жилых многоквартирных домов.

В качестве примера на рис. 1 представлены графики распределения  $\cos\varphi$ ,  $\operatorname{tg}\varphi$ ,  $\gamma$  и  $\delta$  для электропотребителя школа №4.

Для школ значения коэффициента РМ находятся в диапазоне от 0,13 до 1,14 в летний период года и от 0,23 до 1,43 в зимний период года, для детских садов от 0,13 до 1,20 в летний период года и от 0,19 до 1,33 в зимний период, для техникума от 0,17 до 0,70 в летний период года и от 0,29 до 1,17 в зимний период, для общежития техникума от 0,38 до 1,33 в летний период года и от 0,50 до 1,14 в зимний период, для административных зданий (полиция, администрация) от 0,08 до 0,46 в летний период года и от 0,18 до 1,30 в зимний период, для торгово-развлекательных и спортивных сооружений (бассейн, фитнес центр, торгово-развлекательный центр) от 0,11 до 0,72 в летний период года и от 0,29 до 1,26 в зимний период, для жилых домов (5ти этажные и 9ти этажные) от 0,18 до 1,00 в летний период года и от 0,21 до 1,29 в зимний период, для гостиницы (5ти этажная) от 0,42 до 0,84 в летний период года и от 0,38 до 1,08 в зимний период.

Оценка неравномерности потребления активной и реактивной мощности по фазам сети показала, что для школ значения  $\gamma$  и  $\delta$  находятся в диапазоне от 1,08 до 5,60 и от 1,14 до 5,17 соответственно, для детских садов от 1,14 до 4,60 и от 1,16 до 4,80 соответственно, для техникума от 1,32 до 2,25 и от 1,55 до 4,50 соответственно, для общежития техникума от 1,27 до 2,25 и от 1,22 до 2,67 соответственно, для административных зданий от 1,21 до 4,00 и от 1,36 до 3,33 соответственно, для торгово-развлекательных и спортивных сооружений от 1,18 до 3,00 и от 1,25 до 3,80 соответственно, для жилых домов от 1,20 до 5,33 и от 1,00 до 5,00 соответственно, для гостиницы от 1,24 до 4,41 и от 1,06 до 7,60 соответственно.

Таким образом, максимальное значение коэффициента неравномерности потребления активной мощности по фазам сети достигает 5,60, а коэффициента неравномерности потребления РМ 7,60. Значения коэффициента РМ достигают 1,43, что более чем в 4 раза превышает нормируемое значение.

На основании чего можно утверждать, что в низковольтных системах электроснабжения городов требуется КРМ.

Однако применительно к низковольтным системам электроснабжения городов с установленной неравномерной реактивной нагрузкой по фазам сети классическая КРМ с симметричным принципом компенсации по фазам будет иметь низкую эффективность ввиду возможной недокомпенсации и/или перекомпенсации РМ в отдельных фазах. В таком случае необходимо использовать компенсацию с принципом автоматической независимой пофазной КРМ, которая исключает возможность возникновения режимов недокомпенсации и перекомпенсации.

Для подтверждения актуальности задачи снижения тока в нейтральном проводе с целью предотвращения его термического разрушения на примере города Дудинки за период с 2010 по 2015 год было рассмотрено 215 аварийных отключений отходящих фидеров от 13 трансформаторных подстанций.

При анализе аварийности рассматривались следующие аварийные режимы: трёхфазное короткое замыкание (КЗ), двухфазное КЗ, однофазное КЗ, перегрузка, обрыв силовых или нейтральной жил кабеля. Также рассматривались последствия аварийного режима: термическое разрушение кабеля, термическое разрушение коммутационного аппарата, выход из строя электроприборов у электропотребителей.

В табл. 1 приведён количественный анализ аварийных отключений в сетях до 1000 В города Дудинки.

Таблица 1

**Количественный анализ аварийных отключений в сетях до 1000 В города Дудинки**

Table 1

**Quantitative analysis of emergency shutdowns in networks up to 1000 V in the city of Dudinka**

№	Вид аварии	Кол-во аварийных отключений	Доля в общем числе аварийных отключений, %	Последствия аварии					
				Термическое разрушение КЛ		Разрушение ком. аппарата		Выход из строя электроприборов	
				кол-во	доля, %	кол-во	доля, %	кол-во	доля, %
1	3х фазное КЗ	21	9,77	2	0,9	2	0,9	—	—
2	2х фазное КЗ	25	11,63	3	1,4	1	0,5	—	—
3	1-фазное КЗ	37	17,21	23	10,7	—	—	—	—
4	Перегрузка	45	20,93	19	8,8	—	—	—	—
5	Обрыв (отгорание) фазы	8	3,72	—	—	—	—	—	—
6	Термическое разрушение нейтрального провода	79	36,74	72	33,5	—	—	68	31,6
7	Итого	215	100,00	119	55,3	3	1,40	68	31,6

Количественный анализ аварийных отключений показал, что основными авариями в сетях до 1000 В города Дудинки являются: однофазное КЗ, перегрузка и термическое разрушение нейтрального провода. При этом в 68 случаях отгорания нейтрального провода из 79 происходил выход из строя бытовых электроприборов и оргтехники.

Из-за неравномерной и несимметричной нагрузки по фазам в нейтральном проводе могут протекать значительные токи, которые приводят к интенсивному его нагреву, что, в свою очередь, может вызвать термическое разрушение изоляции между нейтральным и фазным проводом кабеля, которое и приведёт к возникновению однофазного КЗ [14].

Следовательно, неравномерная и несимметричная нагрузка по фазам сети является основной причиной термического разрушения нейтрального провода и возникновения однофазных КЗ, что подтверждает актуальность задачи снижения тока в нейтральном проводе.

Для предотвращения термического разрушения нейтрального провода необходимо реконструировать существующие сети с заменой кабелей на кабели с большим сечением нейтрального провода, равного или более сечению фазных проводов. Также для решения данной проблемы может быть проложен дополнительный нейтральный провод. Однако данные решения требуют значительных финансовых затрат и направлены на решение только одной задачи снижения аварийности городских сетей.

Данная проблема может быть решена за счёт эффективной КРМ, которая позволит не только сократить потери электрической энергии и увеличить пропускную способность систем электропитания, но и снизить аварийность электрических сетей до 1000 В.

Для подтверждения данной гипотезы необходимо провести исследования возможности снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений с помощью КРМ.

#### **Исследование возможности снижения тока в нейтральном проводе с помощью компенсации реактивной мощности**

Исследование влияния неравномерности нагрузки на величину тока в нейтральном проводе в реальных условиях эксплуатации КЛ является сложной задачей, которую оптимально выполнить на основе математического (компьютерного) моделирования с помощью программной среды Matlab/Simulink.

На рис. 2 приведена схема построенной компьютерной модели для изучения влияния неравномерности нагрузки на величину тока в нейтральном проводе, а также возможности снижения данного тока с помощью разных способов КРМ.

С учётом установленной неравномерности активной и реактивной нагрузок в электрических сетях до 1000 В города Дудинки моделирование неравномерности осуществлялось в диапазоне от 1 до 10. Измерялись и фиксировались токи в фазах сети и нейтральном проводе, фазные и линейные напряжения.

Оценка возможности снижения тока в нейтральном проводе с помощью КРМ осуществлялась на примере алюминиевого кабеля сечением  $3 \times 95 + 1 \times 50$ , который зачастую используется в городских системах электроснабжения.

Для определения значений допустимого длительного тока использовались данные приведённые в 7 издании ПУЭ. Принимался кабель с алюминиевыми жилами с резиновой или пластмассовой изоляцией в свинцовой, поливинилхлоридной и резиновой оболочках, при прокладке в земле с сечением фазных проводов  $95 \text{ мм}^2$  и сечением нейтрального провода  $50 \text{ мм}^2$ , допустимый длительный ток в фазах сети принимался равным 255 А, допустимый длительный ток в нейтральном проводе 175 А. Понижающий коэффициент 0,92 для четырехжильных кабелей с пластмассовой изоляцией на напряжение до 1 кВ не применялся.

Результаты компьютерного моделирования были оформлены в виде зависимостей тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной (индуктивной) нагрузки при различных нерав-

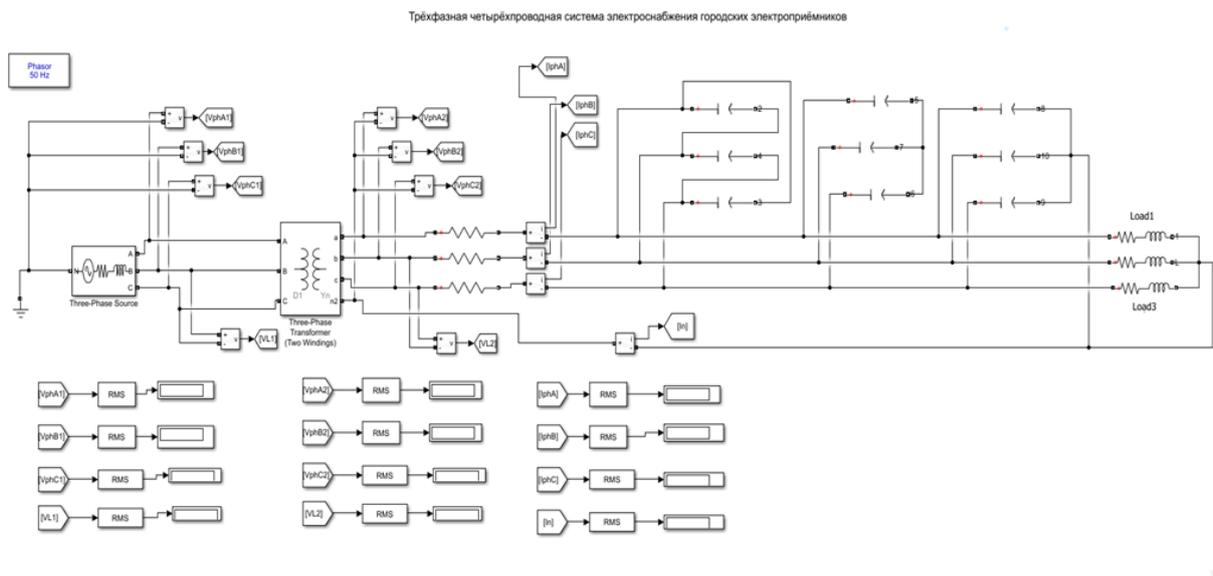


Рис. 2. Схема компьютерного моделирования электроэнергетической системы города

Fig. 2. Scheme of computer simulation of city electric power system

номерностях активной нагрузки. Коэффициент реактивной мощности принимался равным 0,95. Полная мощность рассчитывалась таким образом, чтобы ток в фазах не превышал допустимый длительный ток.

На рис. 3 приведены зависимости тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной нагрузки без учёта КРМ, где цифрами от 1 до 10 обозначены кривые значений тока в нейтральном проводе при различных неравномерностях по активной нагрузке (1:  $\gamma = 1$ ; 2:  $\gamma = 2$ ; 3:  $\gamma = 3$ ; 4:  $\gamma = 4$ ; 5:  $\gamma = 5$ ; 6:  $\gamma = 6$ ; 7:  $\gamma = 7$ ; 8:  $\gamma = 8$ ; 9:  $\gamma = 9$ ; 10:  $\gamma = 10$ ). Цифрам от 1 до 10 соответствуют следующие цвета: 1 – чёрный, 2 – жёлтый, 3 – коричневый, 4 – серый, 5 – зелёный, 6 – голубой, 7 – синий, 8 – тёмно-синий, 9 – фиолетовый, 10 – розовый.

Красной линией обозначено предельное значение допустимого длительного тока в нейтральном проводе, не вызывающего его термическое разрушение.

Анализ полученных зависимостей показал, что ток в нейтральном проводе не превышает допустимых длительных значений при неравномерности активной нагрузки от 1 до 10 и неравномерности реактивной нагрузки от 1 до 3,5. Соответственно, можно утверждать, что с высокой вероятностью в данных диапазонах неравномерностей активной и реактивной нагрузок термического разрушения нейтрального провода не произойдёт. В то же время при неравномерности реактивной нагрузки сверх полученного диапазона возможно отгорание нейтрального провода.

На рис. 4 представлены зависимости тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной нагрузки при симметричной КРМ, при которой компенсация производится на одинаковую величину в каждой фазе, а конденсаторы собираются по схеме «треугольник» или «звезда без нейтрального провода».

Анализ полученных зависимостей показал, что ток в нейтральном проводе также, как и до КРМ, не превышает допустимых длительных значений при неравномерности активной нагрузки от 1 до 10 и неравномерности реактивной нагрузки от 1 до 3,5. Следовательно, симметричная КРМ не эффективна в задаче снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений и предотвращения его термического разрушения.

Также было установлено, что влияние симметричной компенсации на ток в нейтральном проводе практически идентично и не зависит по какой из трёх фаз сети происходит управление симметричной КРМ.

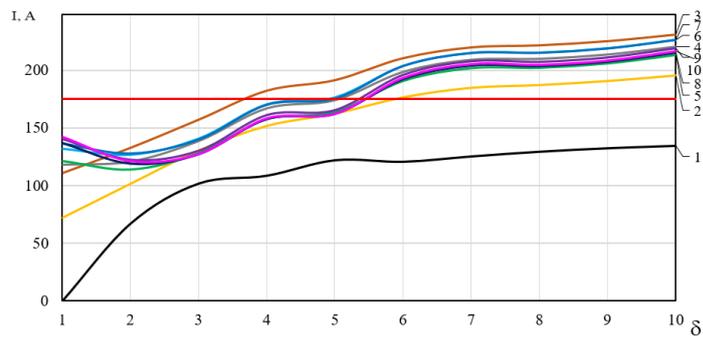


Рис. 3. Зависимости значений тока в нейтральной проводе от  $\delta$  для кабеля 3x95+1x50  
 Fig. 3. Dependences of current values in neutral wire on  $\delta$  for cable 3x95+1x50

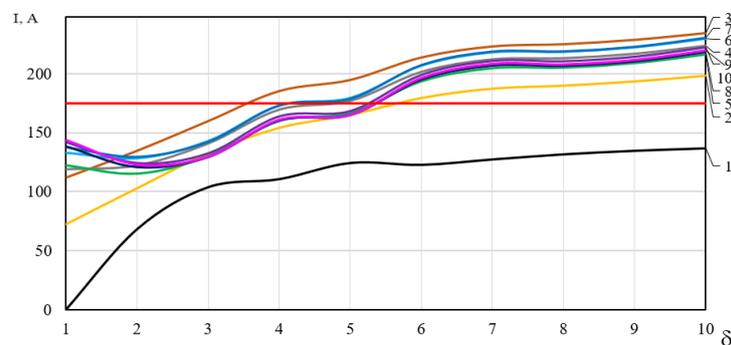


Рис. 4. Зависимости значений тока в нейтральной проводе от  $\delta$  для кабеля 3x95+1x50 при симметричной КРМ  
 Fig. 4. Dependences of current values in neutral wire on  $\delta$  for cable 3x95+1x50 with symmetrical reactive power compensation

При независимой пофазной КРМ измерение и регулирование РМ производится по каждой фазе в отдельности независимо друг от друга, а конденсаторы собираются по схеме «звезда с заземлённой нейтральной точкой».

Функциональная схема устройства автоматической независимой пофазной КРМ приведена на рис. 5 [15, 16].

Устройство автоматической независимой пофазной КРМ принципиально отличается от известных в настоящее время принципом регулирования мощности, которое осуществляется независимо пофазно в отличие от симметричного регулирования в известных устройствах, а также конфигурацией соединения конденсаторов по схеме «звезда с заземлённой нейтральной точкой» в отличие от схем соединения конденсаторов «звездой» или «треугольником» в известных устройствах [17–19].

На рис. 6 представлены зависимости тока в нейтральном проводе от неравномерной реактивной нагрузки при независимой пофазной КРМ.

Анализ полученных зависимостей показал, что ток в нейтральном проводе не превышает допустимые длительные значения во всём диапазоне неравномерностей как активной, так и реактивной нагрузок.

Таким образом, результаты компьютерного моделирования подтверждают возможность исключения термического разрушения нейтрального провода за счёт снижения протекающего в

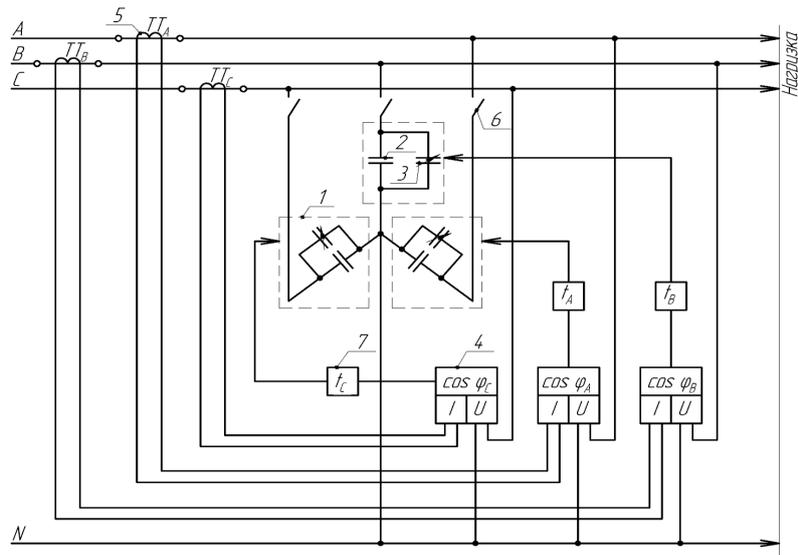


Рис. 5. Функциональная схема устройства автоматической независимой пофазной КРМ  
 Fig. 5. Functional diagram of the device for automatic independent individual phase reactive power compensation

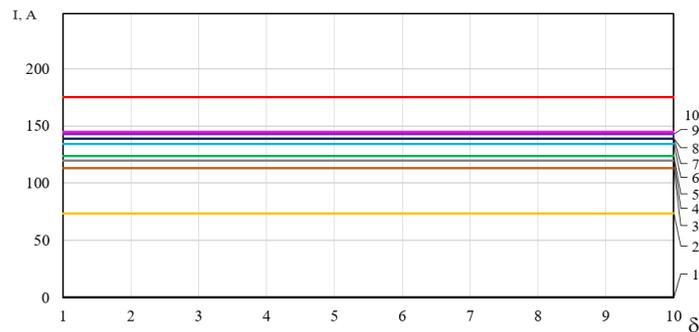


Рис. 6. Зависимости значений тока в нейтральной проводе от  $\delta$  для кабеля 3x95+1x50 при независимой пофазной КРМ  
 Fig. 6. Dependences of current values in neutral wire on  $\delta$  for cable 3x95+1x50 with independent individual phase reactive power compensation

нём тока до допустимых длительных значений с помощью эффективной КРМ по принципу независимой пофазной компенсации без применения индуктивных элементов, подключаемых между нейтральным проводом сети и нейтральной точкой конденсаторов, используемых в конденсаторных симметрирующих устройствах.

Симметрирующие устройства для трёхфазных сетей с нейтральным проводом имеют систему управления от уровня несимметрии токов и напряжений в сети до 1000 В или от тока в нейтральном проводе, а КРМ является второстепенной функцией, регулирование мощности осуществляется симметрично по фазам сети. В предлагаемом устройстве используется система управления от коэффициента мощности в отдельных фазах сети с независимым пофазным регулированием мощности, что принципиально отличает предлагаемое устройство от известных симметрирующих устройств [20–24].

Следовательно, независимая пофазная КРМ при использовании в низковольтных системах электроснабжения городов с преобладающей неравномерной и несимметричной нагрузкой по фазам сети позволит не только снизить потери электроэнергии и увеличить пропускную способность систем электроснабжения, но и снизить аварийность электрических сетей до 1000 В городов.

### Заключение

Анализ электропотребления электропотребителей города Дудинки показал значительное превышение коэффициента РМ по сравнению с нормативными значениями у всех исследуемых объектов. Данное обстоятельство указывает на необходимость КРМ в низковольтных системах электроснабжения городов.

Также было установлено, что потребление РМ в одной из фаз сети может отличаться в 7,6 раза по сравнению с потреблением другими фазами, что позволяет сделать вывод о неэффективности симметричной КРМ в городских электрических сетях до 1000 В и рациональности применения независимой пофазной компенсации.

Анализ аварийности городских сетей до 1000 В города Дудинки показал, что на термическое разрушение нейтрального провода приходится почти 37% от общего числа аварийных отключений. Это подтверждает актуальность решения задачи снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений.

На основе компьютерного моделирования выявлена возможность снижения тока в нейтральном проводе до допустимых длительных значений с помощью независимой пофазной КРМ.

Независимая пофазная КРМ позволяет не только снизить потери электроэнергии и увеличить пропускную способность систем электроснабжения, но и сократить количество аварийных отключений в электрических сетях до 1000 В.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А. Повышение эффективности компенсации реактивной мощности на основе устройств пофазной компенсации // Журнал Сибирского федерального ун-та. Техника и технологии. 2020. № 13 (1). С. 14–24.

[2] Иванов И.В. Определение реактивной составляющей тока с помощью преобразования Кларка-Парка // Поколение будущего. Взгляд молодых учёных: Сб. научных статей. Курск: Юго-западный гос. ун-т, 2022. С. 27–30.

[3] Мещеряков В.Н., Белоусов А.С. Система снижения пусковых токов и момента однофазного асинхронного двигателя // Информационные системы и технологии ИСТ-2021: Сб. трудов конференции. Нижний Новгород: Нижегородский гос. тех. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2021. С. 251–256.

[4] Белянский С.В. Исследование влияния бытовых электрических приемников на показатели качества электроэнергии // Молодежь и научно-технический прогресс: Сб. трудов конференции. Вып. 3. Губкин: ООО «Ассистент плюс», 2019. С. 11–15.

[5] Белицкий А.А., Шклярский Я.Э. Компенсация несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырёхпроводных сетях низкого напряжения // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. № 11 (2). С. 531–540.

[6] Moghaddam H.A., Vahedi A., Ebrahimi S.H. Optimum control strategy for shunt active filter under disturbed AC voltage and unbalanced load conditions in 4-wire power system, 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, Iran, (2017) 217–222.

[7] Ojo A., Awodele K., Sebitosi A. Load Compensation in a Three-Phase Four Wire Distribution System Considering Unbalance, Neutral Current Elimination and Power Factor Improvement, Southern African Uni-

versities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, (2019) 389–394.

[8] **Guo Z.Q., Panda S.K., Prasanna I.V.** Design of new control strategies for a four-leg three-phase inverter to eliminate the neutral current under unbalanced loads, International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA), Hiroshima, Japan, (2014) 1580–1585.

[9] **Бершадский И.А., Якимишина В.В., Наглюк Е.Я.** Влияние несинусоидальности и несимметрии в четырехпроводной сети непромышленных потребителей на снижение пропускной способности кабелей // Вестник Донецкого национального технического ун-та. 2020. № 2 (20). С. 18–25.

[10] **Лакомов И.В., Помогаев Ю.М., Аксенов И.И.** Особенности расчета электрической сети с газоразрядными лампами // Современные научно-практические решения в АПК: Сб. трудов конференции. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2017. С. 132–135.

[11] **Белов А.В., Ильин Ю.П., Смирнов А.П.** Устройство контроля обрыва нулевого провода в сетях напряжением 0,38 кВ // АПК России. 2018. Т. 25. № 1. С. 80–88.

[12] **Самохин В.И., Самохин Д.В., Сухоставский И.В., Бабкин Е.Е.** Основные направления энергосбережения на предприятиях и оборудовании, используемое для энергосбережения // Электронные и информационные системы. 2020. № 1 (24). С. 63–76.

[13] **Кудрина А.Е., Зеленый А.А., Колмаков В.О.** Перекос фаз в трехфазной сети // Инновационные научные исследования. 2021. № 1-1 (3). С. 62–83.

[14] **Наумов И.В.** Симметрирование режимов работы внутренних электрических трёхфазных сетей как средство снижения пожарной опасности // Актуальные вопросы аграрной науки. 2021. № 38. С. 19–26.

[15] **Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А.** Устройство для пофазной компенсации реактивной мощности. Пат. 2697259 Российская Федерация, МПК7 H 02 J 3/18; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2019105614; заявл.27.02.2019; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23. 9 с.: ил.

[16] **Kuzmin R.S., Zavalov A.A., Kuzmin S.V.** Influence of Reactive Power Compensation on Power Quality in Grids Up to 1000V, Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, (2020) 1–5.

[17] **Максачев Ю.А., Саблин А.Ю., Шрамак В.Б.** Устройство компенсации реактивной мощности. Пат. 75517 Российская Федерация, МПК H 02 J (2006.01); заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Русская электротехническая компания» («РУСЭЛКОМ»). № 2008110903/22; заявл.21.03.2008; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 22. 6 с.: ил.

[18] **Антонов С.В., Антонов И.С., Лычагов С.А., Мосолов В.Г.** Установка конденсаторная для компенсации реактивной мощности. Пат. 96670 Российская Федерация, МПК G04F 10/04; заявитель и патентообладатель Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики». № 2010102407/22; заявл.27.01.2010; опубл. 10.08.2008, Бюл. № 22. 6с.: ил.

[19] **Шишкин С.А.** Компенсация реактивной мощности однофазных нагрузок низковольтных систем электроснабжения // Силовая Электроника. 2007. № 3. С. 122–125.

[20] **Pana A., Baloi A., Molnar-Matei F.** From the Balancing Reactive Compensator to the Balancing Capacitive Compensator, Energies, № 11, (2018) 1–23.

[21] **Pana A., Baloi A., Molnar-Matei F.** Iterative Method for Determining the Values of the Susceptances of a Balancing Capacitive Compensator, Energies, 11 (10), (2018) 1–18.

[22] **Дулепов Д.Е., Дулепова Ю.М., Кондраненкова Т.Е.** Результаты лабораторных исследований регулируемого симметрирующего устройства для трехфазной сети с нейтральным проводом // Вестник НГИЭИ. 2019. № 8 (99). – С. 44–54.

[23] **Гринкруг М.С., Митин И.А., Ткачева Ю.И.** Способ снижения потерь электроэнергии в распределительных сетях 6(10)/0,4 кВ. Пат. 2349012 Российская Федерация, МПК7 H02J3/00 H02J3/28; заявитель и патентообладатель ГОУВПО «КНАГТУ». 2007149185/09; заявл.29.12.2007; опубл. 10.03.2009, Бюл. № 7. 6 с.: ил.

[24] **Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Криштопа Н.Ю., Кузнецов Е.С.** Фильтросимметрирующее устройство для снижения потерь от несимметрии токов и повышения качества электрической энергии в сетях 0,38 кВ // Энергоэлектрика. Передача и распределение. 2017. № 2 (41). – С. 32–37.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЗАВАЛОВ Артем Александрович** – ассистент, Сибирский федеральный университет, без степени.

E-mail: zavalovartem@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

**КУЗЬМИН Илья Сергеевич** – генеральный директор, ООО ГК "Рутас", без степени.

E-mail: is@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7296-4178>

**КУЛИКОВСКИЙ Валерий Сергеевич** – заведующий кафедрой, доцент, Сибирский федеральный университет, канд. техн. наук.

E-mail: kvs47@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6019-8301>

### REFERENCES

[1] **S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov**, Povysheniye effektivnosti kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na osnove ustroystv pofaznoy kompensatsii [Increase of Reactive Power Compensation Efficiency on the Basis of Individual Phase Compensation Devices] // Zhurnal Sibirskogo federalnogo un-ta. Tekhnika i tekhnologii. 2020. № 13 (1). S. 14–24.

[2] **I.V. Ivanov**, Opredeleniye reaktivnoy sostavlyayushchey toka s pomoshchyu preobrazovaniya Klarka-Parka [Determination of reactive component of current using the Clark-Park transformation] // Pokoleniye budushchego. Vzglyad molodykh uchenykh: Sb. nauchnykh statey. Kursk: Yugo-zapadnyy gos. un-t., 2022. S. 27–30.

[3] **V.N. Meshcheryakov, A.S. Belousov**, Sistema snizheniya puskovykh tokov i momenta odnofaznogo asinkhronnogo dvigatelya [System for reducing starting currents and torque of a single-phase asynchronous motor] // Informatsionnyye sistemy i tekhnologii IST-2021: Sb. trudov konferentsii. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gos. tekhn. un-t im. R.Ye. Alekseyeva, 2021. S. 251–256.

[4] **S.V. Belyanskiy**, Issledovaniye vliyaniya bytovykh elektricheskikh priyemnikov na pokazateli kachestva elektroenergii [Study of influence of household electrical receivers on power quality indicators] // Molodezh i nauchno-tekhnicheskiy progress: Sb. trudov konferentsii. Vyp. 3. Gubkin: ООО «Assistent plyus», 2019. S. 11–15.

[5] **A.A. Belitskiy, Ya.E. Shklyarskiy**, Kompensatsiya nesinusoidalnykh tokov i tokov nesimmetrii v chetyrehprovodnykh setyakh nizkogo napryazheniya [Compensation of non-sinusoidal and unbalance currents in four-wire low voltage networks] // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki. 2016. № 11 (2). S. 531–540.

[6] **H.A. Moghaddam, A. Vahedi, S.H. Ebrahimi**, Optimum control strategy for shunt active filter under disturbed AC voltage and unbalanced load conditions in 4-wire power system, 8<sup>th</sup> Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Mashhad, Iran, (2017) 217–222.

[7] **A. Ojo, K. Awodele, A. Sebitosi**, Load Compensation in a Three-Phase Four Wire Distribution System Considering Unbalance, Neutral Current Elimination and Power Factor Improvement, Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, (2019) 389–394.

[8] **Z.Q. Guo, S.K. Panda, I.V. Prasanna**, Design of new control strategies for a four-leg three-phase inverter to eliminate the neutral current under unbalanced loads, International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 – ECCE ASIA), Hiroshima, Japan, (2014) 1580–1585.

[9] **I.A. Bershadskiy, V.V. Yakimishina, Ye.Ya. Naglyuk**, Vliyaniye nesinusoidalnosti i nesimmetrii v chetyrekhprovodnoy seti nepromyshlennykh potrebiteley na snizheniye propusknoy sposobnosti kabeley [Influence of non-sinusoidality and asymmetry in a four-wire network of non-industrial consumers on the reduction of cable throughput] // Vestnik Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo un-ta. 2020. № 2 (20). S. 18–25.

[10] **I.V. Lakomov, Yu.M. Pomogayev, I.I. Aksenov**, Osobennosti rascheta elektricheskoy seti s gazorazryadnymi lampami [Features of the calculation of electrical network with gas discharge lamps] // Sovremennyye nauchno-prakticheskiye resheniya v APK: Sb. trudov konferentsii. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. Imperatora Petra I, 2017. S. 132–135.

[11] **A.V. Belov, Yu.P. Ilin, A.P. Smirnov**, Ustroystvo kontrolya obryva nulevogo provoda v setyakh napryazheniyem 0,38 kV [Device for monitoring the break of neutral wire in networks with a voltage of 0.38 kV] // APK Rossii. 2018. T. 25. № 1. S. 80–88.

[12] **V.I. Samokhin, D.V. Samokhin, I.V. Sukhostavskiy, Ye.Ye. Babkin**, Osnovnyye napravleniya energosberezheniya na predpriyatiyakh i oborudovaniye, ispolzuyemoye dlya energosberezheniya [The main directions of energy saving at enterprises and equipment used for energy saving] // Elektronnyye i informatsionnyye sistemy. 2020. № 1 (24). S. 63–76.

[13] **A.Ye. Kudrina, A.A. Zelenyy, V.O. Kolmakov**, Perekos faz v trekhfaznoy seti [Phase imbalance in a three-phase network] // Innovatsionnyye nauchnyye issledovaniya. 2021. № 1-1 (3). S. 62–83.

[14] **I.V. Naumov**, Simmetrirovaniye rezhimov raboty vnutrennikh elektricheskikh trekhfaznykh setey kak sredstvo snizheniya pozharney opasnosti [Symmetrization of operating modes of internal electrical three-phase networks as a means of reducing fire hazard] // Aktualnyye voprosy agrarnoy nauki. 2021. № 38. S. 19–26.

[15] **R.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov**, Ustroystvo dlya pofaznoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Device for independent individual reactive power compensation]. Pat. 2697259 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H 02 J 3/18; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sibirskiy federalnyy universitet». № 2019105614; zayavl.27.02.2019; opubl. 13.08.2019, Byul. № 23. 9 s.: il.

[16] **R.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, S.V. Kuzmin**, Influence of Reactive Power Compensation on Power Quality in Grids Up to 1000V, Proceedings 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, (2020) 1–5.

[17] **Yu.A. Maksachev, A.Yu. Sablin, V.B. Shramek**, Ustroystvo kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Reactive power compensation device]. Pat. 75517 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H 02 J (2006.01); zayavitel i patentoobladatel Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu «Russkaya elektrotekhnicheskaya kompaniya» («RUSELKOM»). № 2008110903/22; zayavl.21.03.2008; opubl. 10.08.2008, Byul. № 22. 6 s.: il.

[18] **S.V. Antonov, I.S. Antonov, S.A. Lychagov, V.G. Mosolov**, Ustanovka kondensatornaya dlya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti [Capacitive unit for reactive power compensation]. Pat. 96670 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G04F 10/04; zayavitel i patentoobladatel Mezhhregionalnoye obshchestvennoye uchrezhdeniye «Institut inzhenernoy fiziki». № 2010102407/22; zayavl.27.01.2010; opubl. 10.08.2008, Byul. № 22. 6s.: il.

[19] **S.A. Shishkin**, Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti odnofaznykh nagruzok nizkovoltnykh sistem elektrosnabzheniya [Reactive power compensation of single-phase loads of low-voltage power supply systems] // Silovaya Elektronika. 2007. № 3. S. 122–125.

[20] **A. Pana, A. Baloi, F. Molnar-Matei**, From the Balancing Reactive Compensator to the Balancing Capacitive Compensator, Energies, № 11, (2018) 1–23.

[21] **A. Pana, A. Baloi, F. Molnar-Matei**, Iterative Method for Determining the Values of the Susceptances of a Balancing Capacitive Compensator, *Energies*, 11 (10), (2018) 1–18.

[22] **D.Ye. Dulepov, Yu.M. Dulepova, T.Ye. Kondranenkova**, Rezultaty laboratornykh issledovaniy reguliruyemogo simmetriruyushchego ustroystva dlya trekhfaznoy seti s neytralnym provodom [The results of laboratory studies of an adjustable balancing device for a three-phase network with a neutral wire] // *Vestnik NGIEI*. 2019. № 8 (99). – S. 44–54.

[23] **M.S. Grinkrug, I.A. Mitin, Yu.I. Tkacheva**, Sposob snizheniya poter elektroenergii v raspredelitelnykh setyakh 6(10)/0,4 kV. Pat. 2349012 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H02J3/00 H02J3/28; zayavitel i patentoobladatel GOUVPO «KnAGTU». 2007149185/09; zayavl.29.12.2007; opubl. 10.03.2009, Byul. № 7. 6 s.: il.

[24] **F.D. Kosoukhov, N.V. Vasilyev, N.Yu. Krishtopa, Ye.S. Kuznetsov**, Filtrosimmetriruyushcheye ustroystvo dlya snizheniya poter ot nesimmetrii tokov i povysheniya kachestva elektricheskoy energii v setyakh 0,38 kV // *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye*. 2017. № 2 (41). – S. 32–37.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Artem A. ZAVALOV** – *Siberian Federal University*.

E-mail: zavalovartem@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

**Илья S. KUZMIN** – *LLC GC «Rutas»*.

E-mail: is@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7296-4178>

**Valery S. KULIKOVSKY** – *Siberian Federal University*.

E-mail: kvs47@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6019-8301>

Поступила: 25.05.2023; Одобрена: 29.06.2023; Принята: 16.07.2023.

Submitted: 25.05.2023; Approved: 29.06.2023; Accepted: 16.07.2023.

Научная статья

УДК 621.316.727

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29304>



А.А. Завалов<sup>1</sup> ✉, С.В. Кузьмин<sup>1</sup>,  
Р.С. Кузьмин<sup>2</sup>, В.А. Меньшиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия;

<sup>2</sup> ООО ГК "Рутас", г. Красноярск, Россия

✉ [zavalovartem@mail.ru](mailto:zavalovartem@mail.ru)

## КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4–10 КВ ГОРОДОВ СЕВЕРНЫХ РЕГИОНОВ

*Аннотация.* В настоящей статье обоснована острая необходимость компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения городов, расположенных в северных регионах России. Для этого с помощью прибора комплексного контроля ПКК-57 было исследовано электропотребление 30 электропотребителей, подключенных к низковольтным сетям города Дудинки. Установлено, что измеренные значения коэффициента мощности некоторых электропотребителей превышают расчётные значения, указанные в нормативных документах. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения исследуемых объектов находятся в пределах значений, нормируемых государственным стандартом. Суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока могут превышать 30% и оказывать негативное влияние на КПД и аварийность конденсаторных установок, предназначенных для компенсации реактивной мощности. Потребление активной мощности в одной из фаз сети может отличаться от потребления в других в 5,6 раза, а потребление реактивной мощности в 7,6 раза. В статье предложен способ комплексной компенсации реактивной мощности в городских системах электроснабжения на основе низковольтных конденсаторных установок, в соответствии с которым в сетях до 1000 В осуществляется независимая пофазная компенсация на вводах многоэтажных домов, зданий и строений, а в сетях 6–10 кВ компенсация осуществляется с помощью конденсаторных установок, подключенных через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ на низкой стороне обмотки.

*Ключевые слова:* системы электроснабжения городов, потери электроэнергии, компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности, качество электроэнергии, высшие гармоники.

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (проект № 18261ГУ/2022)

*Для цитирования:*

Завалов А.А., Кузьмин С.В., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А. Компенсация реактивной мощности в электрических сетях 0,4–10 кВ городов северных регионов // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 57–73. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29304>



A.A. Zavalov<sup>1</sup> ✉, S.V. Kuzmin<sup>1</sup>,  
R.S. Kuzmin<sup>2</sup>, V.A. Menshikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia;

<sup>2</sup> LLC GC "Rutas", Krasnoyarsk, Russia

✉ zavalovartem@mail.ru

## REACTIVE POWER COMPENSATION IN ELECTRICAL NETWORKS OF 0.4–10 KV IN CITIES OF NORTHERN REGIONS

**Abstract.** This article substantiates the urgent need for reactive power compensation in power supply systems of cities located in the northern regions of Russia. For this purpose, power consumption of 30 consumers of Dudinka city was studied using power quality analyzer (PKK-57). It was established that the measured power factor for some consumers exceeded the calculated values specified in regulatory documents. The consumers' total harmonic distortion of voltage was within limits of values normalized by state standard. Total harmonic distortion of current can exceed 30% and have a negative impact on efficiency and failure rate of capacitor units designed to compensate for reactive power. Consumption of active and reactive power in one of the phases of network may differ from the consumption in others by 5.6 and 7.6 times, respectively. The article proposes a method for complex compensation of reactive power in urban power supply systems based on low-voltage capacitor units. According to the proposed method, in networks up to 1000 V, independent individual phase compensation is carried out at inputs of multistory residential and municipal buildings, while in networks of 6–10 kV, compensation is carried out using capacitor units connected through a power transformer of 6(10)/0.4 kV at the low side of the winding.

**Keywords:** urban power supply systems, power losses, reactive power compensation, power factor, power quality, higher harmonics.

**Acknowledgements:** The study was financially supported by the Innovation Promotion Fund (Project No. 18261GU/2022)

**Citation:**

A.A. Zavalov, S.V. Kuzmin, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov, Reactive power compensation in electrical networks of 0.4–10 kV in cities of northern regions, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 57–73, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29304>

**Введение.** Потребление электроэнергии городским и сельским населением России возрастает ежегодно вне зависимости от экономической ситуации в стране. Так потребление электроэнергии населением России за прошедшие 30 лет возросло более чем в 2 раза и в настоящее время составляет около 15% от всей потреблённой электроэнергии в России. В то же время электропотребление потребителями, не связанными с промышленностью, сельским хозяйством, строительством и транспортом достигает 30% от общего уровня электропотребления в стране [1]. Для северных регионов России данный показатель составляет 46%, что является особенностью электропотребления городов, расположенных в данных регионах [2].

При непрерывном росте электропотребления в городах и населённых пунктах в последние годы наблюдается изменение характера нагрузки электропотребителей из-за широкого распространения современных электроприборов, освещения и мелкомоторной техники, потребляющих как активную, так и реактивную мощность (РМ).

Как известно, передача РМ по электрическим сетям приводит к увеличению потерь электроэнергии, снижению напряжения в узлах сети и снижению пропускной способности систем электроснабжения [3–5].

В 2022 году наибольший уровень потерь электроэнергии был зафиксирован в сетях низкого напряжения до 1000 В и составил 34,4% от общего уровня потерь электроэнергии в распределительных и магистральных сетях России [6]. Распределение потерь электроэнергии по разным классам напряжения представлено в таблице 1.

В работах [7, 8] установлено, что наибольшая эффективность в решении задачи снижения потерь электроэнергии достигается с помощью компенсации реактивной мощности (КРМ). При этом рационально устанавливать около 70% всей мощности компенсирующих устройств в сетях 0,4 кВ, 25% – в сетях 6–10 кВ и лишь 5% в сетях 110 кВ и выше. В странах с низким уровнем относительных потерь электроэнергии в электрических сетях мощность установленных компенсирующих устройств может достигать 100% мощности генераторов [9].

Таблица 1  
Потери электрической энергии по классам напряжения в 2022 году, млн. кВт·ч

Table 1

Losses of electrical energy by voltage class in 2022, million kW·h

Потери электроэнергии в распределительных и магистральных сетях				
Всего	по уровню напряжения			
	высокое напряжение – 110 кВ и выше	среднее первое напряжение 27,5–60 кВ	среднее второе напряжение 1–20 кВ	низкое напряжение – 0,4 кВ и ниже
90972,8	26979,3	5300,9	27121,7	31570,9
100%	29,7%	5,8%	29,8%	34,7%

Значительную часть электрических сетей 0,4–20 кВ составляют распределительные сети городов и населённых пунктов, по некоторым оценкам около 40% [10].

Однако до недавнего времени считалось, что в системах электроснабжения городов КРМ не требуется [11]. Обосновывалось это тем, что нагрузка в распределительных сетях городов имела преимущественно активный характер из-за особенностей используемых электроприборов (лампы накаливания, электроплиты, электронагреватели и т.п.).

Соответственно, требуется провести анализ нормативных документов, регламентирующих необходимость КРМ в городах и населённых пунктах и устанавливающих расчётные значения коэффициента мощности для определённых электропотребителей.

Цель данного исследования заключается в обосновании необходимости и разработке эффективных способов КРМ в системах электроснабжения городов, расположенных в северных регионах, на современном этапе развития.

#### Компенсация реактивной мощности в низковольтных сетях городов

Проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустановок жилых и общественных зданий до 2003 года регламентировали Ведомственные строительные нормы ВСН 59-88. В 2003 году взамен ВСН 59-88 был введён Свод правил СП 31-110-2003. В 2017 году была внесена поправка, согласно которой данный документ актуален в том случае, если он не противоречит введённому в 2016 году СП 256.1325800.2016 и действующему в настоящее время. Также правила расчёта нагрузки и коэффициентов мощности и РМ регламентирует действующая в настоящее время Инструкция по проектированию городских электрических сетей РД 34.20.185-94.

Вышеперечисленные документы не отражают особенности электропотребления электроприёмников городов, расположенных в северных регионах. Одним из основных показателей электропотребления является коэффициент мощности.

Коэффициент мощности определяется следующим выражением:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где  $P$  – активная мощность,  $S$  – полная мощность.

Коэффициент РМ определяется следующим выражением:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}, \quad (2)$$

где  $Q$  – реактивная мощность.

В пункте 5.2.9 РД 34.20.185-94 указано, что КРМ не требуется для потребителей жилых и общественных зданий, а также для тепловых пунктов, насосных станций, котельных и иных потребителей обслуживания зданий в микрорайонах, если на каждом рабочем вводе суммарная расчётная нагрузка потребителей не превышает 250 кВт.

Вместе с тем, СП 31-110-2003 в пунктах 6.33, 6.34, а СП 256.1325800.2016 в пунктах 7.31, 7.32 определяют отсутствие необходимости КРМ аналогично РД 34.20.185-94 за исключением уточнения «как правило, не требуется».

Соответственно, согласно действующим в настоящее время нормативным документам, регламентирующим проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустановок жилых и общественных зданий, КРМ в системах электроснабжения городов для большинства электропотребителей не требуется ввиду малой мощности, а необходимость КРМ в конкретных случаях должна быть обоснована.

Диапазон допустимых значений коэффициента РМ в часы больших и малых суточных нагрузок электрической сети, определяемый при заключении и исполнении договоров об оказании услуг по передаче электрической энергии, устанавливает приказ Минэнерго России № 380 от 23.06.2015 г. Соблюдение допустимых значений обеспечивается потребителями посредством соблюдения режимов потребления электрической энергии (мощности) либо использования устройств КРМ. В часы больших суточных нагрузок для сетей до 1000 В максимальное значение коэффициента РМ устанавливается равным 0,35 и 0,40 для сетей 1–10 кВ, в часы малых суточных нагрузок равным 0. Однако в приказе не определён алгоритм применения скидок и надбавок к стоимости оказанных услуг по передаче электроэнергии при отклонении реальных значений коэффициента РМ от нормируемых значений. Это приводит к недостаточному стимулированию потребителей к поддержанию значений коэффициента РМ в допустимом диапазоне.

В то же время исследования показывают рациональность глубокой КРМ до значений коэффициента РМ 0–0,10 [12, 13].

В Проекте Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации на период до 2035 года предполагается, что в нормативных правовых актах будут конкретизированы условия для соблюдения потребителями электроэнергии установленных значений соотношения потребления активной и реактивной мощности, в том числе будет создан единый механизм применения скидок и надбавок к стоимости оказанных услуг по передаче электроэнергии, но в настоящее время данная Стратегия не утверждена Правительством Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели по снижению потерь электроэнергии до уровня 7,3%, обозначенной в Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, необходимо в первую очередь осуществлять КРМ в низковольтных электрических сетях, в частности, в городских системах электроснабжения. Действующие нормативные документы, регламентирующие проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустано-

вок жилых и общественных зданий, требуют доработки в части внесения правок в информацию о необходимости КРМ, например, в следующем виде: «КРМ для жилых и общественных зданий, тепловых пунктов, насосных станций, котельных и прочих электропотребителей городов, как правило, требуется».

Анализ сравнения данных, приведённых в вышеописанных нормативных документах, показывает, что расчётные значения  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$  для электропотребителей городской среды в данных документах практически полностью совпадают и за прошедшие три десятилетия не актуализировались и не изменялись.

Для городов, расположенных в северных регионах России, актуальным остается вопрос эффективного освещения жилых и служебных помещений, улиц и площадей. В настоящее время для этой цели используются энергосберегающие системы освещения, на основе светодиодных светильников, коэффициент мощности которых находится в диапазоне 0,53–0,91. Кроме того, современные бытовые приборы, оргтехника, климат системы, используемые как в жилом секторе, так и в административных зданиях, спортивных комплексах и торгово-развлекательных центрах имеют коэффициент мощности в диапазоне 0,25–0,98 [14–16]. В то же время три десятилетия назад большинство электроприборов и систем освещения, используемых в городах имели коэффициент мощности близкий или равный 1.

Электропотребление городов, расположенных в северных регионах, имеет явно выраженный сезонный характер. Зимний период времени характеризуется максимальным электропотреблением и связан с коротким световым днём и максимальной плотностью населения в городе. В летний период за счёт отпусков плотность населения в северных городах снижается, а продолжительный световой день приводит к минимальному потреблению электроэнергии на освещение.

Для уточнения современных значений  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$  для основных электропотребителей городов, расположенных в северных регионах, были выполнены экспериментальные исследования электропотребления в городе Дудинка в зимний и летний период года. Измерения производились в утреннее, дневное и вечернее время суток, т.е. сутки были разбиты на 3 периода по 8 часов каждый (с 00 до 08 часов, с 08 до 16 часов и с 16 до 24 часов).

Электропотребление 7 жилых многоэтажных домов, 7 детских садов, 5 общеобразовательных школ, техникума, общежития техникума, гостиницы, административных зданий, спортивных и торгово-развлекательных сооружений города Дудинки фиксировалось с помощью прибора комплексного контроля ПКК-57 на отходящих линиях к перечисленным объектам.

В ходе измерений электропотребления были получены диапазоны изменений  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$ , зафиксированные в летний и зимний период года в какой-либо из фаз в часы максимума нагрузки, характерные для основных электропотребителей городов, расположенных в северных регионах России. Данные диапазоны представлены в табл. 2.

В табл. 3 приведено сравнение значений  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$ , указанных в нормативных документах и полученных в ходе экспериментальных исследований. Для общеобразовательных школ, детских садов, жилых многоэтажных домов, административных зданий и спортивных сооружений приведены усреднённые значения.

Анализ сравнения измеренных и расчётных значений  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$  показывает, что измеренные значения  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$  для детских садов, общеобразовательных школ, техникумов, гостиниц и административных зданий в летний период года могут совпадать с расчётными значениями, а измеренные значения остальных электропотребителей, представленных в табл. 3, превышают расчётные. В зимний период года измеренные значения  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$  для техникума и гостиницы могут совпадать с расчётными, а значения остальных электропотребителей превышают расчётные.

Таким образом, в нормативных документах, в соответствии с современным характером электропотребления городов, расположенных в северных регионах России, требуется актуализация

расчётных значений  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$  для следующих электропотребителей: многоэтажные дома/квартиры, освещение, детские сады, общеобразовательные школы и административные здания.

Таблица 2

Диапазоны измеренных значений « $\cos\varphi$ » и « $\operatorname{tg}\varphi$ » электропотребителей города

Table 2

Range of power factors measured values of urban power consumers

№	Потребитель электроэнергии	Диапазон измеренных значений			
		Летний период		Зимний период	
		$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$	$\cos\varphi$	$\operatorname{tg}\varphi$
1	Школа №1	0,83–0,89	0,51–0,68	0,62–0,79	0,78–1,28
2	Школа №2 (освещение)	0,88–0,97	0,25–0,54	0,76–0,91	0,45–0,86
3	Школа №2 (силовая часть)	0,89–0,97	0,26–0,50	0,84–0,90	0,47–0,66
4	Школа №3	0,87–0,94	0,36–0,57	0,79–0,87	0,57–0,76
5	Школа №4 (освещение)	0,81–0,91	0,46–0,71	0,71–0,86	0,60–1,00
6	Школа №4 (силовая часть)	0,78–0,95	0,34–0,79	0,59–0,83	0,67–1,38
7	Школа №7 (освещение)	0,66–0,84	0,64–1,13	0,60–0,71	1,00–1,33
8	Школа №7 (силовая часть)	0,71–0,93	0,40–1,00	0,61–0,80	0,75–1,29
9	Детский сад «Белоснежка»	0,78–0,99	0,16–0,81	0,71–0,97	0,23–1,00
10	Детский сад «Умка»	0,78–0,99	0,13–0,80	0,77–0,98	0,21–0,83
11	Детский сад «Забава»	0,71–0,97	0,25–1,00	0,66–0,75	0,87–1,15
12	Детский сад «Сказка»	0,86–0,98	0,21–0,60	0,73–0,95	0,31–0,94
13	Детский сад «Рябинка»	0,83–0,95	0,33–0,67	0,79–0,84	0,64–0,79
14	Детский сад «Льдинка»	0,93–0,99	0,14–0,40	0,80–0,93	0,40–0,75
15	Детский сад «Морозко»	0,93–0,97	0,25–0,40	0,75–0,98	0,19–0,88
16	Зооветеринарный техникум	0,95–0,99	0,17–0,33	0,89–0,96	0,29–0,52
17	Общежитие техникума	0,77–0,87	0,57–0,83	0,66–0,85	0,63–1,14
18	Гостиница	0,81–0,92	0,42–0,72	0,68–0,94	0,38–1,08
19	Жилой дом, Горького 38	0,82–0,87	0,56–0,70	0,68–0,75	0,88–1,07
20	Жилой дом, Щорса 35	0,86–0,90	0,48–0,59	0,70–0,84	0,66–1,02
21	Жилой дом, Щорса 33	0,88–0,91	0,45–0,54	0,62–0,85	0,61–1,25
22	Жилой дом, Победы 5	0,85–0,92	0,42–0,63	0,70–0,86	0,59–1,01
23	Жилой дом, Щорса 29	0,80–0,98	0,21–0,75	0,67–0,87	0,55–1,10
24	Жилой дом, Щорса 23Б	0,86–0,93	0,37–0,58	0,78–0,87	0,58–0,81
25	Жилой дом, Победы 4	0,78–0,88	0,54–0,80	0,61–0,85	0,61–1,29
26	Здание администрации	0,93–0,95	0,32–0,39	0,74–0,87	0,56–0,91
27	Здание полиции	0,91–0,93	0,39–0,46	0,61–0,83	0,67–1,30
28	Торгово-развлекательный центр	0,82–0,95	0,32–0,69	0,62–0,88	0,53–1,26
29	Фитнес центр	0,89–0,96	0,28–0,51	0,88–0,93	0,39–0,50
30	Бассейн	0,90–0,92	0,43–0,48	0,75–0,92	0,43–0,87

Таблица 3

Нормируемые и измеренные « $\cos\varphi$ » и « $\text{tg}\varphi$ » электропотребителей городов

Table 3

Standardized and measured « $\cos\varphi$ » and « $\text{tg}\varphi$ » of urban power consumers

№	Потребитель электроэнергетики	СП 256.1325800.2016		Диапазон измеренных значений			
				Летний период		Зимний период	
		$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$	$\cos\varphi$	$\text{tg}\varphi$
1	Квартиры/многоэтажные дома	0,92-0,98	0,20-0,43	0,84-0,91	0,43-0,66	0,68-0,84	0,64-1,08
2	Освещение	0,95	0,33	0,78-0,91	0,45-0,79	0,69-0,83	0,68-1,06
3	Ясли, детские сады	0,95-0,98	0,20-0,25	0,83-0,98	0,21-0,67	0,74-0,91	0,41-0,91
4	Общеобразовательные школы	0,90-0,95	0,25-0,48	0,80-0,93	0,40-0,74	0,69-0,83	0,66-1,07
5	Учебные корпуса ПТУ/техникумов	0,90	0,48	0,95-0,99	0,17-0,33	0,89-0,96	0,29-0,52
6	Гостиницы	0,85-0,90	0,48-0,62	0,81-0,92	0,42-0,72	0,68-0,94	0,38-1,08
7	Административные здания	0,85	0,62	0,92-0,94	0,35-0,43	0,68-0,85	0,62-1,10
8	Общежития учебных заведений	данные не приведены		0,77-0,87	0,57-0,83	0,66-0,85	0,63-1,14
9	Спортивные сооружения	данные не приведены		0,90-0,94	0,35-0,49	0,81-0,92	0,41-0,68
10	Торгово-развлекательные комплексы	данные не приведены		0,82-0,95	0,32-0,69	0,62-0,88	0,53-1,26

В ходе экспериментальных исследований электропотребления в городе Дудинке было установлено, что неравномерность потребления активной и реактивной мощности по отдельным фазам сети электропотребителя в летний период года может соответственно достигать 5,6 раза и 7,6 раза, в зимний период года данный показатель составил 4,3 раза и 4,8 раза.

Неравномерность электропотребления по отдельным фазам сети электропотребителя приводит к росту тока в нейтральном проводе и создаёт условия для его термического разрушения. Наибольшее влияние на ток в нейтральном проводе кабельных линий, используемых в городских сетях напряжением до 1000 В, оказывает неравномерность потребления реактивной мощности. Следовательно, для исключения термического разрушения кабельных линий достаточно осуществить эффективную КРМ [14].

Использование в низковольтных городских сетях устройств КРМ на основе симметричной компенсации приводит к недокомпенсации или перекомпенсации РМ по отдельным фазам сети и может вызывать увеличение тока в нейтральном проводе, то есть повышает вероятность его термического разрушения. Опыт эксплуатации устройств КРМ показал, что при неравномерной нагрузке по фазам наиболее эффективной является независимая пофазная КРМ, которая исключает возможность возникновения режимов недокомпенсации и перекомпенсации в отдельных фазах сети и приводит к снижению тока в нейтральном проводе, тем самым исключает вероятность термического разрушения кабеля.

При КРМ в узлах электрических нагрузок на трансформаторных подстанциях 6(10)/0,4 кВ низковольтные линии, отходящие от подстанции к электроприёмнику, не разгружаются от реактивного тока, а значит потери электроэнергии в них не снижаются. Для снижения потерь электроэнергии в электрических сетях до 1000 В и увеличения пропускной способности систем электр-

троснабжения городов КРМ необходимо осуществлять в максимальной близости к реактивной (индуктивной) нагрузке. Наиболее эффективным местом расположения устройств КРМ в низковольтных системах электроснабжения городов являются вводы отдельных многоэтажных домов, зданий и строений. Тогда потери электроэнергии в низковольтных линиях снизятся, а пропускная способность систем электроснабжения увеличится.

В городе Дудинке на вводах отдельных школ, детских садов, административных зданий, спортивных сооружений, торгово-развлекательного комплекса, техникума и общежития техникума было установлено 22 установки независимой пофазной КРМ.

С помощью компьютерного моделирования в программном комплексе Matlab/Simulink была произведена оценка увеличения пропускной способности кабельной линии и снижения тока в нейтральном проводе в случае независимой пофазной КРМ в часы максимума нагрузки зимнего периода года. В качестве примера в табл. 4 приведены значения токов в фазах и нейтральном проводе до и после независимой пофазной КРМ до значений  $\cos\varphi = 1$  для следующих электропотребителей: школа №3, детский сад «Рябинка», общежитие техникума, бассейн «Нептун», здание полиции.

Таблица 4

**Значения токов в фазах и нейтральном проводе до и после независимой пофазной компенсации реактивной мощности**

Table 4

**Values of currents in phases and neutral wire before and after independent individual phase reactive power compensation**

№	Наименование объекта	До КРМ					После независимой пофазной КРМ				
		$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	$I_N, A$	$\cos\varphi$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	$I_N, A$	$\cos\varphi$
1	Школа №3	351,0	402,8	409,3	101,9	0,83	309,7 (-12%)	327,4 (-19%)	361,6 (-12%)	45,7 (-55%)	1,00
2	Д/С «Рябинка»	83,7	157,2	121,7	70,4	0,82	66,2 (-21%)	131,1 (-17%)	103,3 (-15%)	56,5 (-20%)	1,00
3	Общежитие техникума	190,7	99,5	148,5	114,7	0,72	163,0 (-14%)	75,4 (-24%)	98,8 (-33%)	78,5 (-32%)	1,00
4	Бассейн «Нептун»	141,8	333,3	300,9	132,0	0,85	108,0 (-24%)	310,4 (-7%)	247,9 (-18%)	180,3 (-37%)	1,00
5	Здание полиции	268,9	154,9	204,1	155,5	0,75	226,2 (-16%)	121,7 (-21%)	126,6 (-38%)	102,1 (-34%)	1,00

Анализ сравнения данных, приведённых в табл. 4, показывает, что при независимой пофазной КРМ до  $\cos\varphi = 1$  ток в фазах снижался до 38%, а ток в нейтральном проводе до 55%.

Устройство независимой пофазной КРМ защищено патентом РФ на изобретение № 2 697 259 [17]. Внешний вид устройства представлен на рис. 1.

Современные электроприборы, используемые в городской среде, могут являться источниками высших гармоник тока и напряжения, которые оказывают негативное воздействие на термическое состояние конденсаторов, используемых в устройствах для КРМ [18, 19].

Согласно действующему в настоящее время ГОСТ 32144–2013 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» для электрических сетей напряжением до 1000 В значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения ( $K_V$ ), усреднённые в интервале времени 10 мин., не должны превышать 8,0% в течение 95% времени интервала в одну неделю и 12,0% в течение 100% времени интервала в одну неделю.



Рис. 1. Внешний вид устройства независимой пофазной КРМ

Fig. 1. Appearance of the device of independent individual phase reactive power compensation

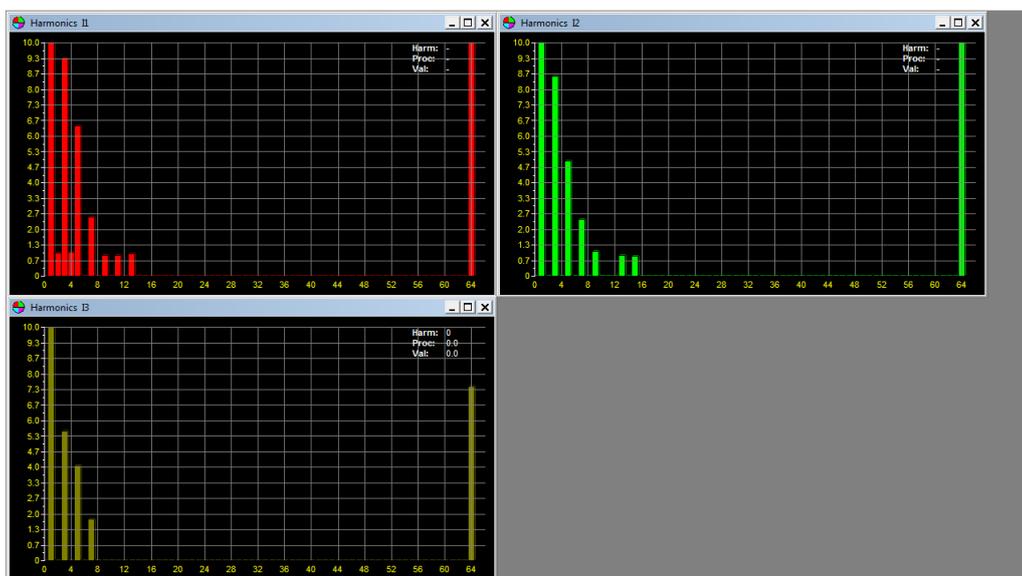


Рис. 2. Высшие гармоники тока в сети пятиэтажного дома

Fig. 2. Higher current harmonics in the network of a five-story building

Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока ( $K_T$ ) в настоящее время не нормируются государственным стандартом. Однако исследования показывают, что наличие высших гармоник тока может привести к снижению КПД конденсаторной установки до 30%. Также если коэффициент гармонических составляющих тока достигает 10%, то безаварийность работы конденсаторной установки снижается до 51%, а увеличение коэффициента свыше 20% приводит к тому, что 85% конденсаторных установок выходят из строя из-за термического разрушения<sup>1</sup>.

Помимо прочего в ходе экспериментальных исследований изучалась величина гармонического искажения синусоиды тока и напряжения в линиях, отходящих от трансформаторных подстанций к электропотребителям города Дудинки.

На рис. 2 в качестве примера приведены гистограммы измерений высших гармоник тока в сети пятиэтажного дома, расположенного по адресу ул. Щорса, д. 29.

В табл. 5 представлены результаты измерений, усреднённых для трёх фаз, значений суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения для 28 объектов, расположенных в городе Дудинка.

Таблица 5

**Результаты измерений суммарных коэффициентов гармонических составляющих в сетях 0,4 кВ г. Дудинки**

Table 5

**Results of total harmonic distortion measurements in 0.4 kV networks of Dudinka**

№ п.п.	Наименование объекта	$K_I, \%$	$K_U, \%$
1	Жилой 9ти этажный дом по ул. Горького, 38	8,5	1,6
2	Жилой 9ти этажный дом по ул. Щорса, 35	5,0	1,6
3	Жилой 9ти этажный дом по ул. Щорса, 33	13,2	1,6
4	Жилой 9ти этажный дом по ул. Победы, 5	10,1	1,6
5	Жилой 5ти этажный дом по ул. Щорса, 29	9,9	1,9
6	Жилой 5ти этажный дом по ул. Щорса, 23Б	15,2	2,1
7	Жилой 5ти этажный дом по ул. Победы, 4	11,4	1,9
8	Здание полиции	19,9	2,5
9	Здание администрации	33,5	5,9
10	Школа-интернат №1	7,1	1,6
11	Школа №4 силовое электрооборудование	6,4	2,1
12	Школа №4 освещение	30,0	2,0
13	Школа №2 силовое электрооборудование	4,5	3,2
14	Школа №2 освещение	11,4	2,4
15	Школа №7 силовое электрооборудование	4,9	2,4
16	Школа №7 освещение	15,7	2,8
17	Школа №3	8,5	1,8
18	Детский сад «Белоснежка»	5,7	1,8
19	Детский сад «Умка»	16,1	2,6
20	Детский сад «Забава»	4,7	2,9
21	Детский сад «Рябинка»	5,2	1,7
22	Детский сад «Льдинка»	8,5	1,6
23	Детский сад «Сказка»	7,2	3,9
24	Детский сад «Морозко»	11,5	4,3
25	Техникум	5,9	1,9
26	Общежитие техникума	11,6	1,9
27	Бассейн «Нептун»	2,5	1,8
28	Развлекательный центр «Арктика»	23,7	2,4

Анализ измеренных данных показал, что для всех исследуемых объектов значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения не превышают 8,0%, а значит не превышают установленные ГОСТом нормируемые значения. В то время как значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока превышают 10,0% для 13 объектов из 28 и могут привести к выходу из строя каждой второй установки по КРМ, расположенных на данном объекте.

Таким образом, с целью защиты от негативного влияния высших гармоник тока низковольтные конденсаторные установки, устанавливаемые на вводах городских электропотребителей, как правило, необходимо комплектовать защитными индуктивными реакторами, настроенными на частоту в диапазоне от 100 до 150 Гц. Подобные индуктивные реакторы используются в вышеуказанной установке.

### **Способ комплексной компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения городов с помощью низковольтных конденсаторных установок**

От распределительных сетей 6–10 кВ городов могут быть запитаны коммунально-бытовые и небольшие промышленные потребители, нагрузкой которых зачастую являются асинхронные электродвигатели. Коэффициент мощности асинхронных электродвигателей в зависимости от марки и мощности может находиться в диапазоне 0,67–0,92<sup>2</sup>. В настоящее время широко используются электродвигатели с регулировкой частоты вращения, то есть системы тиристорный преобразователь-двигатель или частотный преобразователь-двигатель. Малонагруженные тиристорные преобразователи и частотные преобразователи являются источниками высших гармоник тока и напряжения [20, 21].

Для подавления высших гармоник и защиты высоковольтных конденсаторных установок от их негативного влияния, как правило, применяются пассивные или активные фильтры.

Пассивные фильтры эффективны если спектр подавляемых частот достаточно узок. При широком спектре гармоник, характерном для тиристорных преобразователей и преобразователей частоты, значительно возрастает стоимость пассивных фильтров, их габариты и вес. Активные фильтры целесообразны к применению если преобразователи частоты и – тиристорные преобразователи являются маломощными, с ростом их мощности финансовые вложения в активные фильтры превышают стоимость самих преобразователей.

Защита конденсаторных установок предназначенных для КРМ в сетях 6–10 кВ от негативного влияния высших гармоник может быть осуществлена, если установка будет подключена к сетям 6–10 кВ через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ на вторичной стороне обмотки.

Исследования показывают, что при подключении конденсаторных установок ко вторичной обмотке силового трансформатора 6(10)/0,4 кВ мощностью не более 1600 кВ·А достигается высокая степень защиты конденсаторов от негативного влияния высших гармоник, присутствующих в сетях 6–10 кВ, а так же становится возможным использовать низковольтные коммутационные аппараты и конденсаторы вместо высоковольтных, что снизит стоимость установки. При этом конденсаторные установки будут эффективно защищать изоляцию обмоток силового трансформатора от коммутационных перенапряжений [22].

Устройство для компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях с принципом подключения низковольтных конденсаторов и катушек индуктивности к сети 6–10 кВ через силовой трансформатор защищено патентом РФ на изобретение № 2 727 148 [23]. В данном устройстве с помощью трансформатора тока определяется действующий ток в сетях 6–10 кВ и значения коэффициента РМ, если действующее значение коэффициента РМ превышает установленное, то регулятор выдаёт команды на изменение мощности регулируемых катушек индуктивности. Тем самым обеспечивается автоматическое плавное регулирование мощности установки. С учётом относительно равномерного распределения нагрузок по фазам сети 6–10 кВ возможно примене-

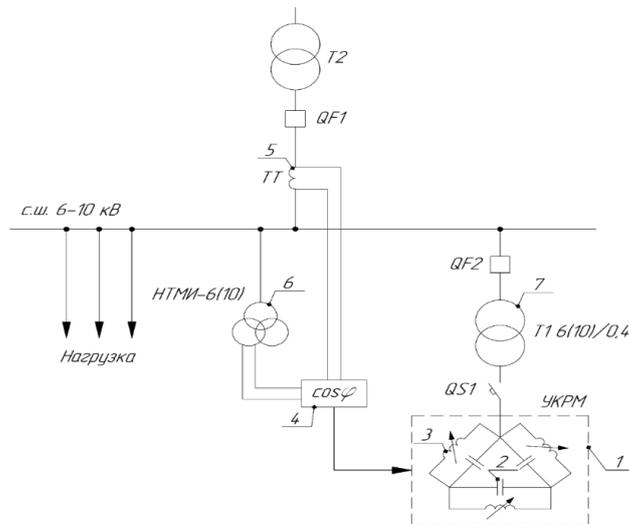


Рис. 3. Функциональная схема устройства для КРМ в высоковольтных сетях  
 Fig. 3. Functional diagram of device for reactive power compensation in high-voltage networks

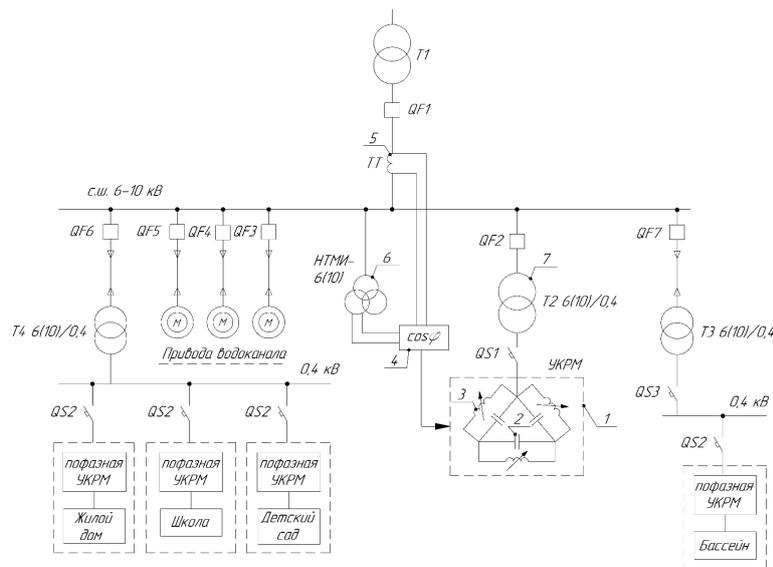


Рис. 4. Комплексная система КРМ в сетях 0,4–10 кВ на базе низковольтных КУ  
 Fig. 4. Complex reactive power compensation system in 0.4–10 kV networks based on low-voltage capacitor banks

ние симметричной компенсации по фазам сети. Функциональная схема такого устройства представлена на рис. 3.

Система комплексной КРМ в городских системах электроснабжения представлена на рис. 4.

Таким образом, система комплексной КРМ в городских электрических сетях 0,4–10 кВ может быть реализована полностью за счёт низковольтных конденсаторных установок. В низковольтных сетях необходимо устанавливать устройства независимой пофазной КРМ на вводах домов, зданий и строений, а для КРМ в сетях 6–10 кВ достаточно использовать низковольтные симметричные конденсаторные установки, подключенные через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ.

Представленный способ комплексной КРМ позволит сократить потери электроэнергии в сетях 0,4–10 кВ городов и увеличить пропускную способность систем электроснабжения в целом.

### Заключение

1. Наиболее острый характер КРМ имеет место в распределительных сетях до 1000 В городов, расположенных в северных регионах Российской Федерации.

2. Действующие нормативные документы, регламентирующие проектирование, строительство и монтаж городских электрических сетей и электроустановок жилых и общественных зданий, требуют доработки в части внесения правок в информацию о необходимости КРМ, например, в следующем виде: «КРМ для жилых и общественных зданий, тепловых пунктов, насосных станций, котельных и прочих электропотребителей городов, как правило, требуется».

3. В нормативных документах, в соответствии с современным характером электропотребления, требуется актуализация расчётных значений  $\cos\varphi$  и  $\text{tg}\varphi$  для следующих электропотребителей: многоэтажные дома/квартиры, освещение, детские сады, общеобразовательные школы и административные здания.

4. Ввиду неравномерного распределения нагрузки по фазам сети в низковольтных сетях городов рационально осуществлять независимую пофазную КРМ на базе автоматически регулируемых конденсаторных установок, при размещении данных устройств на вводах отдельных домов, зданий и строений, что практически исключает термическое разрушение нейтрального провода кабельных линий и тем самым повышает надёжность электроснабжения городских электропотребителей.

5. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения для всех исследованных объектов города Дудинки не превышают 8% и соответствуют требованиям ГОСТа 1234124. Значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока превышают 10% для 13 объектов из 28 и могут достигать 33,5%, что снижает надёжность устройств КРМ практически в 2 раза. Конденсаторные установки для КРМ в низковольтных системах электроснабжения городов необходимо комплектовать защитными реакторами от негативного влияния высших гармоник тока.

6. В узлах электрических нагрузок 6–10 кВ с наличием высших гармоник тока и напряжения КРМ может быть реализована с помощью низковольтных автоматически регулируемых конденсаторных установок, подключенных к узлам электрических нагрузок 6–10 кВ через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ, что позволит обеспечить высокую эффективность защиты от негативного влияния высших гармоник на КПД и термическую устойчивость установки при меньших финансовых затратах.

7. Система комплексной КРМ в сетях 0,4–10 кВ городов на базе низковольтных конденсаторных установок, подключенных в низковольтных сетях к вводам отдельных домов, зданий и строений с принципом независимой пофазной компенсации, и подключенных к узлам электрических нагрузок 6–10 кВ через силовой трансформатор 6(10)/0,4 кВ, позволит выполнить автоматическую КРМ и тем самым эффективно сократить потери электроэнергии и увеличить пропускную способность систем электроснабжения в целом.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Электробаланс и потребление электроэнергии в Российской Федерации. Режим доступа: [https://rosstat.gov.ru/enterprise\\_industrial](https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial) (дата обращения: 05.06.2023).

[2] Низкоуглеродные решения для изолированных регионов России с высокими затратами на энергию. Режим доступа: [http://www.cenef.ru/file/Low-Carbon\\_rus.pdf](http://www.cenef.ru/file/Low-Carbon_rus.pdf) (дата обращения: 05.06.2023).

- [3] **Miron A., Cziker A.C., Ungureanu S., Beleiu H.G., Darab C.P.** Reactive Power Compensation at Industrial Consumers: Romanian Study Case, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, (2022) 101–106.
- [4] **Tiwari R., Prabhakaran K.K., Chelliah T.R., Joshi L.P.** Performance Analysis of Extra High Voltage 765 kV and 400 kV Hydro Power fed Transmission Lines, IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Bari, Italy, (2021) 1–6.
- [5] **Wang Y., Wang T., Zhou K.** Reactive Power Optimization of Wind Farm Considering Reactive Power Regulation Capacity of Wind Generators, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, (2019) 4031–4035.
- [6] Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). Фактические потери электроэнергии в сети по типам напряжения. Режим доступа: <https://fedstat.ru/indicator/61481> (дата обращения: 23.06.2023).
- [7] **Могиленко А.В.** Снижение потерь электроэнергии Российские реалии // Новости электротехники. 2015. № 2 (92).
- [8] **Паули В.К., Воротников Р.А.** Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии // Энергоэксперт. 2007. № 2. – С. 16–23.
- [9] **Власюк И.В., Парамонов С.Ю., Белов С.И.** Влияние компенсации реактивной мощности на энергосбережение предприятий АПК // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 2. – С. 40–46.
- [10] **Гордиевский И.Г., Лордкипанидзе В.Д.** Оптимизация параметров электрических сетей : под ред. Г.В. Сербиновского М.: Энергия, 1978. 145 с.
- [11] **Поспелов Г.Е., Сыч Н.М.** Потери мощности и энергии в электрических сетях : под ред. Г.Е. Поспелова М.: Энергоиздат, 1981. 216 с.
- [12] **Манусов В.З., Третьякова Е.С.** Глубокая компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения производства // Энергоресурсосбережение и энергоэффективность. 2017. № 4. – С. 33–38.
- [13] **Манусов В.З., Третьякова Е.С.** Повышение энергоэффективности на промышленных предприятиях при выполнении глубокой компенсации реактивной мощности // ЭЛЕКТРО. 2015. № 5. – С. 2–7.
- [14] **Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А.** Повышение эффективности компенсации реактивной мощности на основе устройств пофазной компенсации // Журн. Сиб. федер. ун-та: Техника и технологии. 2020. № 13 (1). – С. 14–24.
- [15] **Hannagan J., Woszczeiko R., Langstaff T., Shen W., Rodwell J.** The Impact of Household Appliances and Devices: Consider Their Reactive Power and Power Factors, Sustainability, 15 (1):158, (2023) 1–11.
- [16] **Arsov L., Mircevski S., Iljazi I., Arsova I., Cundeva M.** Energy efficiency of the new household appliances, 15<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, (2013) 1–9.
- [17] **Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А.** Устройство для пофазной компенсации реактивной мощности. Пат. 2697259 Российская Федерация, МПК7 Н 02 J 3/18; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2019105614; заявл.27.02.2019; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23. 9 с.: ил.
- [18] **Xie X., Chen D.** Data-driven dynamic harmonic model for modern household appliances, Applied Energy, (312), (2022).
- [19] **Камолов М.М., Назиров Х.Б., Исмоилов С.Т., Джураев Ш.Д., Амирханов А.С.** Экспериментальная оценка качества электрической энергии современных коммунально-бытовых и офисных электроприемников // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. № 2 (46). – С. 26–33.

[20] Пантелеев В.И., Кузьмин И.С., Завалов А.А., Тихонов А.В., Умецкая Е.В. Качество электрической энергии в системах электроснабжения горно-перерабатывающих предприятий России // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3. – С. 356–368.

[21] Антонов А.И., Руди Д.Ю., Хацевский К.В. Исследование качества электроэнергии в электрических сетях с полупроводниковыми преобразователями // Вестник Югорского государственного университета. 2023. № 1 (68). – С. 123–130.

[22] Кузьмин Р.С., Завалов А.А., Майнагашев Р.А., Меньшиков В.А., Кузьмин И.С. Влияние компенсации реактивной мощности на величину перенапряжений при коммутации силовых трансформаторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 3. – С. 197–209.

[23] Кузьмин С.В., Завалов А.А., Кузьмин Р.С., Меньшиков В.А., Кузьмин И.С. Устройство для компенсации реактивной мощности в высоковольтных сетях. Пат. 2727148 Российская Федерация, СПК Н02J 3/18; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2019143473; заявл. 19.12.2019; опубл. 21.07.2020, Бюл. № 21. 9 с.: ил.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЗАВАЛОВ Артем Александрович** – ассистент, Сибирский федеральный университет, без степени.

E-mail: zavalovartem@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

**КУЗЬМИН Сергей Васильевич** – доцент, Сибирский федеральный университет, канд. техн. наук.

E-mail: rutas2004@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1209-2961>

**КУЗЬМИН Роман Сергеевич** – доцент, ООО ГК "Рутас", канд. техн. наук.

E-mail: r.s.kuzmin@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3330-0267>

**МЕНЬШИКОВ Виталий Алексеевич** – доцент, ООО ГК "Рутас", канд. техн. наук.

E-mail: v.a.menshikov@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3706-0436>

## REFERENCES

[1] Elektrobilans i potrebleniye elektroenergii v Rossiyskoy Federatsii. [Electricity balance and electricity consumption in the Russian Federation] Rezhim dostupa: [https://rosstat.gov.ru/enterprise\\_industrial](https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial) (data obrashcheniya: 05.06.2023).

[2] Nizkouglerodnyye resheniya dlya izolirovannykh regionov Rossii s vysokimi zatratami na energiyu. [Low-carbon solutions for isolated regions of Russia with high energy costs] Rezhim dostupa: [http://www.cenef.ru/file/Low-Carbon\\_rus.pdf](http://www.cenef.ru/file/Low-Carbon_rus.pdf) (data obrashcheniya: 05.06.2023).

[3] A. Miron, A.C. Cziker, S. Ungureanu, H.G. Beleiu, C.P. Darab, Reactive Power Compensation at Industrial Consumers: Romanian Study Case, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, (2022) 101–106.

[4] **R. Tiwari, K.K. Prabhakaran, T.R. Chelliah, L.P. Joshi**, Performance Analysis of Extra High Voltage 765 kV and 400 kV Hydro Power fed Transmission Lines, IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Bari, Italy, (2021) 1–6.

[5] **Y. Wang, T. Wang, K. Zhou**, Reactive Power Optimization of Wind Farm Considering Reactive Power Regulation Capacity of Wind Generators, IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, (2019) 4031–4035.

[6] Yedinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema (YeMISS). Fakticheskiye poteri elektroenergii v seti po tipam napryazheniya. [Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS). Actual electricity losses in the network by voltage types.] Rezhim dostupa: <https://fedstat.ru/indicator/61481> (data obrashcheniya: 23.06.2023).

[7] **A.V. Mogilenko**, Snizheniye poter elektroenergii Rossiyskiye realii [Reduction of electricity losses Russian realities] // Novosti elektrotehniki. 2015. № 2 (92).

[8] **V.K. Pauli, R.A. Vorotnikov**, Kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti kak effektivnoye sredstvo ratsionalnogo ispolzovaniya elektroenergii. [Reactive power compensation as an effective means of rational use of electricity] // Energoekspert. 2007. № 2. – S. 16–23.

[9] **I.V. Vlasyuk, S.Yu. Paramonov, S.I. Belov**, Vliyaniye kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na energosberezheniye predpriyatiy APK. [Influence of reactive power compensation on energy saving of agribusiness enterprise] // Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal. 2018. № 2. – S. 40–46.

[10] **I.G. Gordiyevskiy, V.D. Lordkipanidze**, Optimizatsiya parametrov elektricheskikh setey. [Optimization of electrical network parameters] : pod red. G.V. Serbinovskogo M.: Energiya, 1978. 145 s.

[11] **G.Ye. Pospelov, N.M. Sych**, Poteri moshchnosti i energii v elektricheskikh setyakh [Power and energy losses in electrical networks] : pod red. G.Ye. Pospelova M.: Energoizdat, 1981. 216 s.

[12] **V.Z. Manusov, Ye.S. Tretyakova**, Glubokaya kompensatsiya reaktivnoy moshchnosti v sistemakh elektrosnabzheniya proizvodstva. [Deep reactive power compensation in production power supply systems] // Energoresursosberezheniye i energoeffektivnost. 2017. № 4. – S. 33–38.

[13] **V.Z. Manusov, Ye.S. Tretyakova**, Povysheniye energoeffektivnosti na promyshlennykh predpriyatiyakh pri vypolnenii glubokoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti. [Improving energy efficiency in industrial plants when performing deep reactive power compensation] // ELEKTRO. 2015. № 5. – S. 2–7.

[14] **S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov**, Povysheniye effektivnosti kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na osnove ustroystv pofaznoy kompensatsii. [Improving the Efficiency of Reactive Power Compensation Based on Individual Phase Compensation Devices] // Zhurn. Sib. feder. un-ta: Tekhnika i tekhnologii. 2020. № 13 (1). – S. 14–24.

[15] **J. Hannagan, R. Woszczeiko, T. Langstaff, W. Shen, J. Rodwell**, The Impact of Household Appliances and Devices: Consider Their Reactive Power and Power Factors, Sustainability, 15 (1):158, (2023) 1–11.

[16] **L. Arsov, S. Mircevski, I. Iljazi, I. Arsova, M. Cundeva**, Energy efficiency of the new household appliances, 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, (2013) 1–9.

[17] **S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov**, Ustroystvo dlya pofaznoy kompensatsii reaktivnoy moshchnosti. [Device for individual phase reactive power compensation]. Pat. 2697259 Rossiyskaya Federatsiya, MPK7 H 02 J 3/18; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sibirskiy federalnyy universitet». № 2019105614; zayavl.27.02.2019; opubl. 13.08.2019, Byul. № 23. 9 s.: il.

[18] **X. Xie, D. Chen**, Data-driven dynamic harmonic model for modern household appliances, Applied Energy, (312), (2022).

[19] **M.M. Kamolov, Kh.B. Nazirov, S.T. Ismoilov, Sh.D. Dzhurayev, A.S. Amirkhanov**, Eksperimentalnaya otsenka kachestva elektricheskoy energii sovremennykh kommunalno-bytovykh i ofisnykh elektropriyemnikov. [Experimental assessment of the quality of electric energy of modern household and office power receivers] // Politekhnicheskii vestnik. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya. 2019. № 2 (46). – S. 26–33.

[20] V.I. Panteleyev, I.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, A.V. Tikhonov, Ye.V. Umetskaya, Kachestvo elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya gorno-pererabatyvayushchikh predpriyatiy Rossii. [The quality of electrical energy in the power supply systems of mining and processing enterprises in Russia] // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2021. T. 25. № 3. – S. 356–368.

[21] A.I. Antonov, D.Yu. Rudi, K.V. Khatsevskiy, Issledovaniye kachestva elektroenergii v elektricheskikh setyakh s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami. [Investigation of the quality of electricity in electrical networks with semiconductor converters] // Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. 2023. № 1 (68). – S. 123–130.

[22] R.S. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.A. Maynagashev, V.A. Menshikov, I.S. Kuzmin, Vliyaniye kompensatsii reaktivnoy moshchnosti na velichinu perenapryazheniy pri kommutatsii silovykh transformatorov. [Influence of reactive power compensation on the magnitude of overvoltages during switching of power transformers] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2021. T. 332. № 3. – S. 197–209.

[23] S.V. Kuzmin, A.A. Zavalov, R.S. Kuzmin, V.A. Menshikov, I.S. Kuzmin, Ustroystvo dlya kompensatsii reaktivnoy moshchnosti v vysokovoltnykh setyakh. [Device for reactive power compensation in high-voltage networks]. Pat. 2727148 Rossiyskaya Federatsiya, SPK H02J 3/18; zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Sibirskiy federalnyy universitet». № 2019143473; zayavl. 19.12.2019; opubl. 21.07.2020, Byul. № 21. 9 s.: il.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Artem A. ZAVALOV** – *Siberian Federal University*.

E-mail: zavalovartem@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-1722>

**Sergey V. KUZMIN** – *Siberian Federal University*.

E-mail: rutas2004@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1209-2961>

**Roman S. KUZMIN** – *LLC GC "Rutas"*.

E-mail: r.s.kuzmin@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3330-0267>

**Vitalii A. MENSHIKOV** – *LLC GC "Rutas"*.

E-mail: v.a.menshikov@rutas.group

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3706-0436>

Поступила: 05.07.2023; Одобрена: 11.08.2023; Принята: 13.09.2023.

Submitted: 05.07.2023; Approved: 11.08.2023; Accepted: 13.09.2023.

Научная статья

УДК 62-1/-9

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>



Э.Р. Маннанов ✉, А.М. Костельов,  
А.Г. Филин, В.Н. Железняк

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

✉ [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

*Аннотация.* В составе современных маневренных энергетических установок с приводом от газовых турбин традиционно применяются турбогенераторы с воздушным охлаждением, уровни эксплуатационных воздействий в которых высоки. Система электрической изоляции обмоток статоров является конструктивным элементом, который во многом определяет надёжную эксплуатацию турбогенераторов, особенно с воздушным охлаждением, учитывая сопряжённое воздействие повышенных тепловых, механических и электрических нагрузок. Актуальной задачей является обеспечение высокой надёжности таких турбогенераторов. АО «Силовые машины» применяли технологию вакуум нагнетательной пропитки статора (Global VPI) для производства турбогенераторов мощностью до 225 МВт с воздушным охлаждением. Однако, это техническое решение нельзя назвать успешным, так как в процессе эксплуатации в ряде генераторов, изготовленных в последние годы, имелись неисправности, приводившие к внеплановым ремонтам. Перевод изготовления линейки турбогенераторов с воздушным охлаждением, также включая новый турбогенератор для проекта ГТЭ-170, на технологию предварительно пропитанных лент (Resin Rich) позволил обеспечить соизмеримый уровень воздействующих температур, модернизировать систему пазовых уплотнений и коронозащиты на основе использования упругого радиального и бокового уплотнения стержня в пазе. Решены имеющиеся проблемы разрядной активности, термомеханических перемещений и ремонтпригодности статоров, что позволяет прогнозировать повышение эксплуатационной надёжности таких турбогенераторов. В конструкции системы изоляции турбогенератора для технологии Resin Rich применены только отечественные материалы, что является важным преимуществом в сложившихся условиях.

*Ключевые слова:* электроизоляционный материал, статорная обмотка, теплопроводность, система изоляции, надёжность.

*Для цитирования:*

Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., Железняк В.Н. Повышение эксплуатационной надёжности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–89. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>

*E.R. Mannanov* ✉, *A.M. Kostelov*,  
*A.G. Filin*, *V.N. Zheleznyak*

JSC “Power machines”, St. Petersburg, Russia

✉ [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

## IMPROVEMENT OF OPERATIONAL RELIABILITY OF AIR-COOLED TURBOGENERATORS FOR A GAS TURBINE PLANT

**Abstract.** Modern mobile power plants driven by gas turbines traditionally use air-cooled turbogenerators, the levels of operational impacts of which are quite high. The system of electrical insulation of stator windings is a structural element that largely determines the reliable operation of turbogenerators, especially those with air cooling, taking into account the coupled impact of increased thermal, mechanical and electrical loads. An urgent task is to ensure high reliability of such turbogenerators. JSC Power Machines used the technology of vacuum pressure impregnation of the stator (Global VPI) for the production of air-cooled turbogenerators with a capacity of up to 225 MW. However, this technical solution cannot be viewed as successful, since during operation, a number of generators manufactured in recent years had malfunctions that led to unscheduled repairs. The production of a line of air-cooled turbogenerators, including a new turbogenerator for the GTE-170 project, was transferred to the technology of pre-impregnated tapes (Resin Rich). Such a transfer made it possible to ensure a commensurate level of influencing temperatures, modernize the system of slot seals and corona protection layers based on the use of elastic radial and lateral sealing of the rod in the slot. The existing problems of discharge activity, thermomechanical displacements and maintainability of stators were solved, which makes it possible to predict an increase in the operational reliability of such turbogenerators. In the design of the turbogenerator insulation system for the Resin Rich technology, only domestic materials were used, which is an important advantage in the current conditions.

**Keywords:** electrical insulating material, stator winding, thermal conductivity, insulating system, reliability.

**Citation:**

E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.G. Filin, V.N. Zheleznyak, Improvement of operational reliability of air-cooled turbogenerators for a gas turbine plant, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 74–89, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29305>

**Введение.** Газовая турбина является ключевым элементом парогазового цикла – самой эффективной сегодня технологии в традиционной тепловой энергетике. В отношении газовых турбин большой мощности Россия до сих пор полностью зависит от зарубежных поставок, что создает угрозу энергетической безопасности страны<sup>1</sup>. АО «Силловые машины» при поддержке Минпромторга России реализуют проект возобновления производства газовых турбин высокой мощности в России<sup>2</sup>, разработана первая в РФ газовая турбина ГТЭ-170<sup>3</sup> [1, 2].

В составе современных маневренных энергетических установок с приводом от газовых турбин традиционно применяются турбогенераторы с воздушным охлаждением. АО «Силловые маши-

<sup>1</sup> Министерство энергетики РФ [вебсайт]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22981> Дата обращения: 27.06.23.

<sup>2</sup> В «СИЛОВЫХ МАШИНАХ» СОСТОЯЛОСЬ МЕЖВЕДОМСТВЕННОЕ СОВЕЩАНИЕ ПО ВОПРОСАМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РФ [вебсайт]. URL: <https://power-m.ru/press-center/news/v-silovykh-mashinakh-sostoyalos-mezhvedomstvennoe-soveshchanie-po-voprosam-tekhnologicheskogo-suvere/> Дата обращения: 27.06.23.

<sup>3</sup> «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ» Завершили сборку головного образца российской газовой турбины большой мощности ГТЭ-170 [вебсайт]. URL: <https://power-m.ru/press-center/news/silovye-mashiny-zavershili-sborku-golovno-go-obrazt-sa-rossiyskoy-gazovoy-turbiny-bolshoy-moshchnosti/> Дата обращения: 27.06.23.

ны» разрабатывает и производит мощные турбогенераторы с воздушным охлаждением типа ТЗФ, максимальной мощности 225 МВт, 350 МВт (в проекте). Данные турбогенераторы отличает простота конструкции, сниженные затраты на эксплуатацию в виду отсутствия водородной системы, системы масляных уплотнений и системы непосредственного водяного охлаждения активных частей генератора. В паре с газовой турбиной ГТЭ-170 выработку электроэнергии на электростанции осуществляет турбогенератор мощностью 155 МВт серии ТЗФ-160-2МУЗ [3]. Одной из наиболее актуальных задач является обеспечение высокой надёжности турбогенераторов.

Турбогенераторы серии ТЗФ-160-2МУЗ имеют замкнутую вытяжную систему вентиляции. Циркуляцию охлаждающего воздуха в статорной цепи обеспечивают модифицированные центробежные вентиляторы. Движение воздуха по каналам ротора создается за счет давления, создаваемого при вращении этими каналами. Обмотка статора в пазовой части охлаждается косвенно при посредстве U-образных каналов, организованных вентиляционными распорками, расположенными между пакетами сердечника статора. Это означает прохождение всего объема основных и добавочных потерь, выделяемых в обмотке, через тепловой барьер, образованный системой её электрической изоляции, и, как следствие – высокий уровень термомеханических воздействий на эту систему [4]. На основании данных рассуждений и опыта эксплуатации турбогенераторов с воздушным охлаждением можно сделать вывод о том, что надёжность таких машин во многом определяет система изоляции обмотки статора [5, 6].

В процессе эксплуатации происходит изменение свойств материалов применяемых в системе изоляции, что в процессе эксплуатации может приводить к снижению срока службы генератора или к аварийным остановам. В последние годы возросло количество неисправностей, связанных с различными видами износа системы изоляции турбогенераторов с воздушным охлаждением. Большая часть опубликованной литературы указывает на повышенные тепловые и электрические нагрузки, которые могут привести к ускоренной деградации, связанной с частичным разрядом, в качестве причины таких наблюдений [7, 8].

#### **Факторы, влияющие на работоспособность электрической изоляции**

Воздействие электрического поля проявляется в возникновении и развитии электроразрядных процессов – внутренних частичных разрядов (ВЧР) и пазовых частичных разрядов (ПЧР), а также виброискровых разрядов (ВИ) [9, 10].

На рис. 1 представлен вариант типичного конструктивного исполнения паза статора турбогенератора с отдельно изготовленными и уложенными в статор стержнями обмотки. Защитную функцию основной изоляции от электроразрядной активности выполняет система коронозащиты.

Общепризнано<sup>4</sup>, что ВЧР являются причиной электрического старения слюдосодержащей корпусной изоляции высоковольтных электрических машин. Тем не менее, термореактивная корпусная изоляция высоковольтных электрических машин может нормально функционировать в течение всего срока службы при наличии достаточно интенсивных ВЧР. При этом критического ухудшения ресурса не наблюдается в виду специфических свойств современной корпусной изоляции, содержащей в своем составе слюдяной барьер [12, 13]. Принципиально иначе протекают процессы, происходящие в пазовой зоне статорной обмотки, где наблюдаются два типа электрических разрядов – ПЧР и ВИ. Каждый тип этих разрядов имеет одинаковую область распространения, но отличается физическим механизмом возникновения и развития. ПЧР могут возникнуть на поверхности стержня (или катушки) внутри паза сердечника статора [14], они представляют собой пробой газовых промежутков, образующихся между стенками паза и поверхностью изоляции стержня, например, с дефектным или неправильно изготовленным противокоронным покрытием.

<sup>4</sup> Андреев А.М., Дудкин С.М., Монастырский А.Е. и др. Изоляция установок высокого напряжения. Измерения частичных разрядов и оценка технического состояния: учеб. пособие – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. – 88 с.

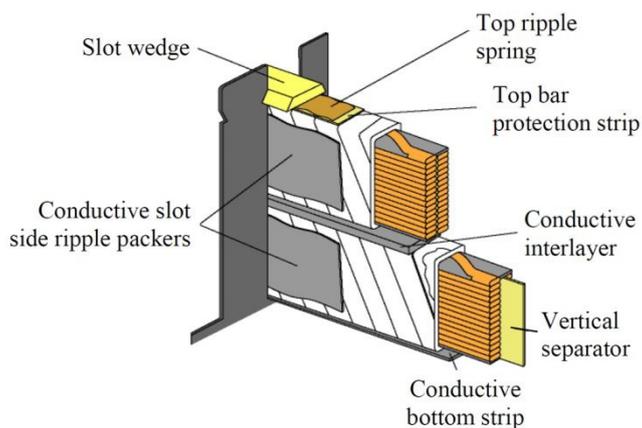


Рис. 1. Коронозащитные слои в технологии Resin Rich  
Fig. 1. Corona protection layers in Resin Rich technology [11]

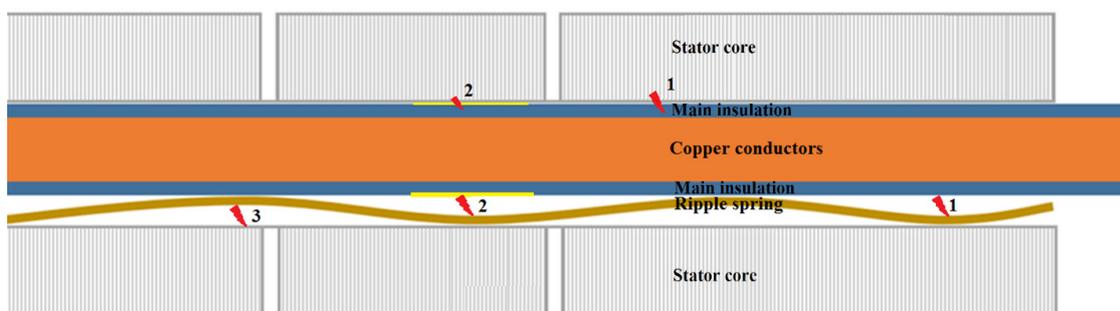


Рис. 2. Характерные ПЧР в воздушном зазоре конструкции пазового уплотнения:  
1. повышенное сопротивление пазового проводящего покрытия, 2. повреждение пазового покрытия в локальной зоне, 3. повышенное сопротивление упругой прокладки  
Fig. 2. Characteristic slot partial discharges in the air gap of the slot seal design: 1. increased resistance of the slot conductive coating, 2. damage to the slot coating in the local zone, 3. increased resistance of the ripple spring

Установлено [15], что в условиях повышения сопротивления проводящего покрытия достигаемое значение напряженности в воздушном зазоре может превышать пробивное напряжение воздушного промежутка, этот же эффект проявляется в условиях локальных повреждений покрытий [11].

На рис. 2 схематично представлены наиболее характерные причины возникновения ПЧР.

Существуют три основных причины возникновения ПЧР в системе изоляции статорной обмотки:

- вибрация ослабленных стержней в пазах приводит к истиранию и разрушению пазового проводящего покрытия в локальной области;
- некачественно изготовленное пазовое проводящее покрытие не обеспечивает выполнения своей функции из-за чрезмерно высокого начального сопротивления или из-за плохого качества наложения покрытия на пазовую часть стержня;
- плохое соединение проводящего покрытия с «землей» [16].

В турбогенераторах с воздушным охлаждением интенсивные ПЧР приводят к образованию озона, который в свою очередь приводит к разрушению коронозащитного покрытия. Такие ПЧР и озон будут воздействовать на корпусную изоляцию, приводя к разъеданию поверхности и образованию сквозного отверстия в корпусной изоляции.

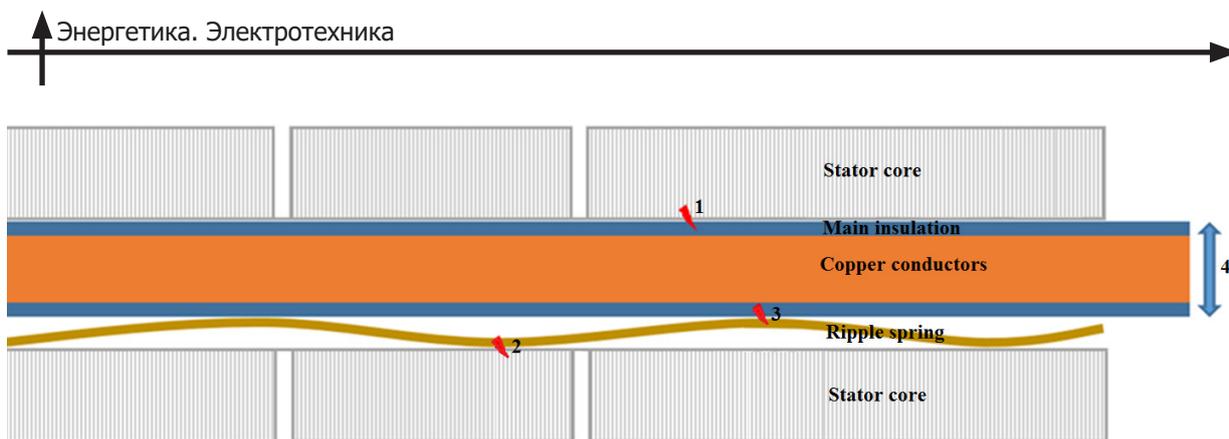


Рис. 3. Зоны потенциального возникновения ВИ в пазовой части обмотки статора в условиях вибрации стержня: 1. сердечник статора – внешнее коронозащитное покрытие стержня, 2. волнистая упругая прокладка-статор, 3. полупроводящее покрытие – волнистая прокладка, 4. вибрация

Fig. 3. Zones of potential occurrence of vibration sparking in the slot part of the stator winding under conditions of vibration of the rod in the stator slot: 1. stator core – external corona-protective coating of the rod, 2. ripple spring – stator, 3. semiconductive coating – ripple spring, 4. vibration

Вибрационное искрение, которое также наблюдается в системах изоляции статорной обмотки высоковольтных турбогенераторов, выглядит подобным процессом, но, в действительности, совершенно отлично от процесса возникновения и разрушения под действием ПЧР [17–20]. Этот механизм запускается потоком возбуждения в сердечнике, тогда как ПЧР могут происходить только на высокопотенциальных стержнях. Причиной ВИ является вибрация стержней в пазе и низкое поверхностное сопротивление пазового проводящего покрытия.

На рис. 3 представлены потенциальные зоны возможного возникновения ВИ в пазовой части обмотки статора [21].

Согласно исследованиям [17–19], между признаками разрушения изоляции, возникшими вследствие ВИ и ПЧР, наблюдаются существенные различия. В отличие от ПЧР, разрушающее воздействие ВИ обусловлено высокой температурой, достигающей в зоне действия электрической дуги значений (6000 – 10000) К, и обычно намного более интенсивно, чем ПЧР. По данным [10, 14], явление ВИ связано с искрением высокой интенсивности, обладающим энергией, достаточной для того, чтобы повлечь за собой довольно быстрый отказ корпусной изоляции стержней уже через несколько лет, причем интенсивность ВИ достаточна для того, чтобы повредить как корпусную изоляцию, так и сегменты сердечника из листовой стали [13].

Изоляция стержней, испытывающих вибрацию в пазах, будет неизбежно подвергаться износу. Поскольку пазовое проводящее покрытие наносится на наружные поверхности стержней в качестве последнего слоя, то это покрытие будет неизбежно повреждаться. При изготовлении обмотки и проведении корректирующих мер следует в первую очередь остановить вибрацию, используя надежные уплотняющие элементы, а, во-вторых, правильно сконструировать внешнее противокоронное покрытие.

У изготовителей имеются различные методы улучшения крепления стержня в пазе после их укладки, например, посредством установки полупроводящих (обычно волнистых) боковых прокладок между стержнем статорной обмотки и железом статора. Тем не менее, установка уплотнений полностью не исключает незаполненных воздушных включений, в которых могут возникнуть ПЧР. Необходимость предотвращения ПЧР, несмотря на наличие неизбежных воздушных включений, определяет основные требования к конструкции статорной обмотки.

Полупроводящий наружный слой коронозащитного покрытия является основной частью решения. Он представляет собой полупроводящее покрытие на поверхности стержня по длине паза. Это покрытие эффективно выполняет свою роль, если будет заземлено, поскольку при наличии

слоя на нулевом потенциале в боковых пустотах не будет возникать разность потенциалов. Надежное заземление наружного коронозащитного слоя является ключевым вопросом конструкции, который решается, когда наружные коронозащитные слои покрытия будут иметь достаточно случайных точек контакта со стенками паза.

Вторым важным условием является оптимальное значение поверхностного удельного сопротивления коронозащитного слоя, обеспечивающего основное требование – недопущение формирования допустимой разности потенциалов в пустотах.

Надежное заземление и соответствующее сопротивление коронозащитного слоя должны предотвращать как ПЧР, так и ВИ.

### **Особенности конструктивных и технологических решений**

Применяемая технология изготовления статора турбогенератора и стержней обмотки диктует технические особенности для конструктивного исполнения уплотнения паза с целью обеспечения работоспособности системы коронозащиты. Особенно большие статоры генераторов должны также оцениваться с точки зрения термомеханических сил в условиях эксплуатации, т. е. сдвигающих усилий в неподвижных стержнях статора [14].

Производители оборудования для изготовления стержней статорных обмоток используют различные технологии, среди которых наибольшее распространение получили следующие технологии:

- вакуум нагнетательная пропитка компаундом статора с предварительно уложенными стержнями (Global VPI);
- изготовление отдельных стержней в прессах или методом гидростатической прессовки с последующей укладкой готовых стержней в статор на основе применения предварительно пропитанных лент (Resin Rich);
- изготовление отдельных стержней путем вакуум нагнетательной пропитки с последующей укладкой готовых стержней в статор (Single VPI).

Наиболее подробно описание основных особенностей технологии изготовления обмоток статоров турбогенераторов представлены в монографиях [21, 22]

Первые две из представленных технологий в настоящее время применяются при производстве турбогенераторов с воздушным охлаждением в АО «Силовые машины». Технологию Global VPI для производства статоров мощных турбогенераторов широко применяет фирма Siemens. Технология Single VPI – наиболее распространенная технология для производства обмоток, которую используют большинство крупных производителей.

Задачи обеспечения работоспособности коронозащитного покрытия успешно решается путем использования упругих полупроводящих прокладок в качестве бокового уплотнения и радиального уплотнения в пазе статора. Преимущества волнистых упругих прокладок подтверждены в работах [23–26]. Однако, этот способ применим только в случае использования технологий изготовления отдельных стержней.

Особую актуальность имеет проблема конструктивного исполнения и защиты от повреждений системы пазового крепления обмотки генераторов с воздушным охлаждением, изготавливаемых по технологии Global VPI, особенно – с точки зрения термомеханических сил в условиях эксплуатации.

К наиболее интересным, следует отнести технические решения, используемые в конструкции турбогенераторов фирмы Siemens. Основной идеей этого и подобных решений, применяемых в технологии изготовления изоляции способом Global VPI, является выполнение противокоронного слоя, заполняющего промежуток между поверхностью изоляции стержня и стенкой паза, в виде пористой трехслойной оболочки. Первый, примыкающий к изоляции, и третий, касающийся стенок паза, слои выполняются наложением ленты (первый слой) или ленты/полотна

(третий слой) из полупроводящего материала. Как правило, используется тканая или волоконная подложка из политетрафторэтилена (PTFE), пропитанная термореактивной смолой (обычно эпоксидной), наполненной углеродом (сажа, графит). Между этими слоями располагается промежуточный (разделительный) второй слой, предназначенный для восприятия и компенсации термомеханических напряжений, образующихся в процессе работы генератора из-за различия теплового расширения проводников стержня, изоляции и сердечника [10].

АО «Силовые машины» в конструкции турбогенераторов мощностью до 225 МВт с воздушным охлаждением, изготавливаемых по технологии Global VPI разработали оригинальную конструкцию для уплотнения стержней в пазе статора на основе вязкоупругих прокладок из кремний-органической резины с полупроводящими свойствами для конструкции бокового уплотнения и диэлектрическими свойствами для конструкции радиального уплотнения [4]. Однако, это техническое решение нельзя назвать успешным, так как в процессе эксплуатации в ряде генераторов, изготовленных в последние годы АО «Силовые машины», имелись неисправности, приводившие к внеплановым ремонтам. Основная причина таких неисправностей заключается в снижении упругих свойств и усадке уплотнений при эксплуатационных воздействиях повышенных температур в обмотке статора и, в результате, возникновения протяженных пустот между стержнем и сердечником паза, нарастанием вибрационных воздействий, с нарастанием интенсивности ПЧР и разрушением изоляции.

Рациональным решением для обеспечения эксплуатационной надежности явился перевод изготовления статоров турбогенераторов с воздушным охлаждением АО «Силовые машины» для линейки мощностей 80–225 МВт с технологии Global VPI на технологию Resin Rich. Это решение позволяет обеспечить модернизацию наиболее проблемных конструктивных элементов, а именно, систему пазовых уплотнений на основе использования упругого радиального диэлектрического и бокового проводящего уплотнения стержня в пазе и системы коронозащиты, в которой применено комбинированное коронозащитное покрытие на основе ленточных и эмалевых покрытий, отличающееся повышенной стойкостью к воздействию ПЧР [27]. Таким образом, могут быть решены проблемы разрядной активности, термомеханических перемещений и ремонтнопригодности статоров.

Выполненные исследования свойств материалов системы коронозащиты и упругих уплотнений в условиях длительного воздействия повышенных рабочих температур выявили тенденцию снижения упругих свойств материалов пазового уплотнения и сопротивления коронозащитных покрытий при повышении воздействующей температуры [28]. Снижение упругих свойств уплотнений может вызвать повышенные вибрации стержней в пазе и создать условия для возникновения вибрационного искрения при условии снижения сопротивления коронозащитного покрытия [29]. Представляется чрезвычайно важным выполнить сравнительную оценку изменения теплового состояния обмотки статора для двух конструктивных решений.

#### **Оценка влияния принятых конструктивных решений в турбогенераторах различных исполнений на тепловое состояние изоляции статора**

Статоры турбогенераторов, изготовленные по технологии Global VPI, обладает лучшей теплопередачей в обмотке за счет исключения воздушных зазоров в боковом уплотнении. Однако, в процессе эксплуатации, применяемые в конструкции уплотнений материалы, могут изменять свои свойства и конструктивные размеры, что неизбежно приводит к повышению уровня температур в эксплуатации. Для возможности достижения аналогичных показателей теплового состояния обмоток статоров для конструкции, изготовленной по технологии Resin Rich АО «Силовые машины» применили материалы основной электрической изоляции с теплопроводностью, повышенной примерно на 30% относительно стандартно применяемой. Дальнейшее улучшение теплового состояния в изоляции обмотки статора возможно за счет использования электроизоля-

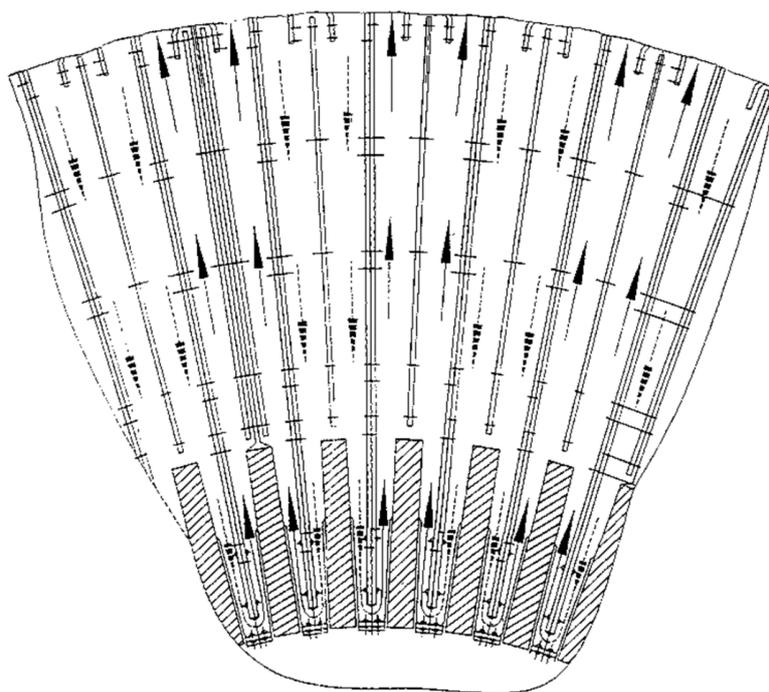


Рис. 4. Охлаждение пазовой части сердечника статора

Fig. 4. Cooling of the slot part of the stator core

ционных материалов с теплопроводностью значительно выше применяемых. В настоящее время АО «Силовые машины» выполняют комплекс НИОКР направленный на создание высокотеплопроводных электроизоляционных материалов путем их наполнения мелкодисперсными высокотеплопроводными наполнителями.

Результаты расчетов коэффициентов эквивалентной теплопроводности системы изоляции пазовой части обмотки статора турбогенератора ТЗФ-160-2МУЗ для Resin Rich и Global VPI, полученные с применением расчетной методики [30, 31] свидетельствуют о снижении теплопередачи лишь на 1 %.

В статьях [30–33] показано, что наибольший эффект на эквивалентную теплопроводность системы изоляции оказывает корпусная изоляция, геометрические параметры которой значительно превосходят остальные конструктивные элементы в системе изоляции статорной обмотки.

При детальном рассмотрении конструкции изоляции для стороны гофрированной прокладки (технология Resin Rich), следует, что преимущество высокой теплопроводности упругой прокладки на основе стеклопластика, имеющей форму гофры в сравнении с вязкоупругой уплотнительной прокладкой из кремнийорганической резины, не имеет ощутимого практического выигрыша ввиду влияния периодических воздушных пустот в упругой прокладке бокового уплотнения.

#### Анализ экспериментальных и расчетных данных

Охлаждение центральной зоны сердечника статора рассматриваемого турбогенератора осуществляется при помощи воздуха, циркулирующего в радиальных U-образных каналах (как показано на рис. 4). Для организации движения воздуха по U-образным каналам на периферии сердечника статора размещены зоны входа (нагнетания) и выхода (разрежения) охлаждающего газа. В радиальных U-образных каналах холодный воздух из зоны нагнетания попадает в радиальные каналы между пакетами активной стали сердечника и проходит последовательно вначале в направлении расточки, а затем – в противоположном направлении к камерам разрежения.

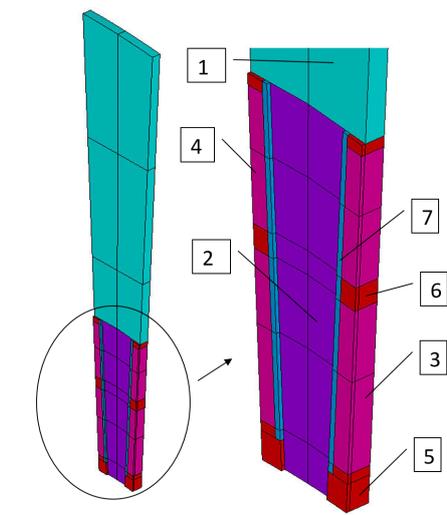


Рис. 5. Модель теплового расчета статора: 1 – ярмо сердечника статора, 2 – зубцы сердечника статора, 3 – верхний стержень обмотки статора, 4 – нижний стержень обмотки статора, 5 – клин,

6 – изоляционные прокладки, 7 – композиция изоляции между проводниками меди в пазе и зубцами  
 Fig. 5. Stator thermal calculation model: 1 – stator core yoke, 2 – stator core teeth, 3 – upper stator winding rod, 4 – lower stator winding rod, 5 – wedge, 6 – insulating gaskets, 7 – insulation composition between copper conductors in slot and teeth

Для организации движения воздуха по U-образным каналам на периферии сердечника статора размещены зоны входа (нагнетания) и выхода (разрежения) охлаждающего воздуха: холодный воздух из зоны нагнетания попадает в радиальные каналы между пакетами активной стали сердечника и проходит последовательно вначале в направлении расточки, а затем – в противоположном направлении к камерам разрежения. В данной конструкции исключен воздухообмен между U-образными каналами статора и воздушным зазором между статором и ротором.

Методика теплового расчёта статора турбогенератора ТЗФ-220-2 была представлена ранее [34, 35]. Аналогичная методика была использована при тепловом расчете данного турбогенератора, с учётом применения U-образных каналов в сердечнике статора, произведен тепловой расчет статора турбогенератора ТЗФ-160-2МУЗ.

Модель теплового расчета статора турбогенератора представляет собой пазовое деление статора, ограниченное, в силу тепловой симметрии, наружной поверхностью ярма и расточкой статора на длине, равной половине пакета стали статора (см. рис. 5).

В качестве исходных данных для выполнения теплового расчета используются исходящие данные электромагнитного и вентиляционного расчетов, полученные по результатам решения соответствующих задач.

На границах объемов, через которые осуществляется конвективный теплообмен (поверхность сердечника, обращенная в U-образные каналы, в расточку статора, а также – периферия сердечника статора), задаются граничные условия третьего рода:

$$-\frac{\partial \Theta_f}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (\Theta_f - \vartheta_0), \quad (1)$$

где  $\Theta_f$  – температура на поверхности,  $n$  – направление нормали,  $\vartheta_0$  – величина подогрева охлаждающей среды,  $\alpha$  и  $\lambda$  – значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности и теплопроводности соответственно.

На плоскостях симметрии расчетной модели задаются условия второго рода:

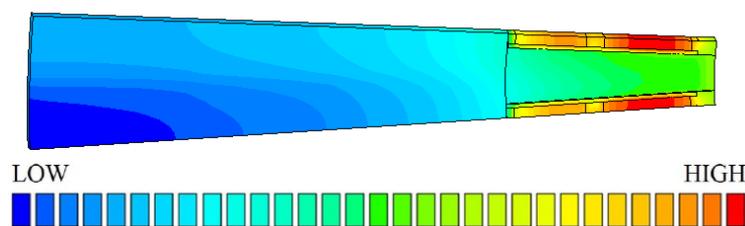


Рис. 6. Картина температурного распределения зубцов сердечника статора и обмотки статора в пазовой части  
 Fig. 6. Temperature distribution of the stator core teeth and the stator winding in the slot part

$$q_f = \text{const} = 0, \quad (2)$$

где  $q_f$  – тепловой поток через поверхность.

На границах, по которым соприкасаются объемы модели, принимаются граничные условия четвертого рода (единственность теплового потока и единственность температуры в любой точке идеальной контактной поверхности двух однородных или разнородных тел):

$$\begin{aligned} \Theta_{1,f} &= \Theta_{2,f}; \\ \lambda_1 \frac{\partial \Theta_{1,f}}{\partial n} &= \lambda_2 \frac{\partial \Theta_{2,f}}{\partial n}. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты пространственного стационарного теплового расчета статора турбогенератора в программе ANSYS представлены на рис. 6, различные подходы к моделированию описаны в [36, 37].

Таким образом, по результатам полевого теплового расчета, превышение температуры обмотки статора над воздухом, выходящим из воздухоохладителей, по показанию штатного термометра сопротивления, установленного между стержнями, не превышает 1 % уровня относительно результатов замеров применительно к серийному турбогенератору с воздушным охлаждением мощностью 160 МВт. Расчетные значения максимальной температуры изоляции стержня в пазовой части статора не превышают 3 % относительно полученных средних значений температуры на поверхности изоляции.

В свою очередь, новые турбогенераторы серии ТЗФ-160-2МУ3 спроектированы со снижением величины добавочных потерь в обмотке статора, что оказало положительный эффект на тепловом состоянии системы изоляции в целом, снизив уровень расчетных значений температуры на 19 %, а перепад температуры по толщине системы изоляции на 30 % относительно верифицированной расчетной модели. Уровень температуры изоляции статора в пазовой части не превышает класса нагревостойкости F.

Следует отметить, что возможное дальнейшее снижение тепловой нагрузки в обмотке статора потенциально обеспечит дополнительное снижение термомеханических нагрузок в изоляции, благоприятно повлияет на надежность турбогенератора. Этого результата можно добиться путем повышения теплопроводности системы изоляции за счет разработки и внедрения высокотеплопроводных электроизоляционных материалов, в частности, корпусной изоляции с новыми свойствами.

### Заключение

Авторами на основании технического анализа и опыта эксплуатации показано, что надёжность турбогенераторов с воздушным охлаждением для современных маневренных энергетиче-

ских установок с приводом от газовых турбин во многом определяет система электрической изоляции обмотки статора. Технический анализ факторов влияющих на работоспособность электрической изоляции показал, что вибрационное искрение и пазовые частичные разряды являются основными факторами, приводящими к повреждению электрической изоляции. Показано, что рациональным решением для обеспечения эксплуатационной надежности явился перевод изготовления статоров турбогенераторов с воздушным охлаждением АО «Силовые машины» для линейки мощностей 80–225 МВт с технологии Global VPI на технологию Resin Rich, для чего на основе внедрения отечественных материалов была модернизирована: -система пазовых уплотнений, на основе использования упругого радиального диэлектрического и бокового проводящего уплотнения стержня в пазе; -система коронозащиты, в которой применено комбинированное коронозащитное покрытие на основе двухслойного ленточного и эмалевого покрытий, отличающееся повышенной стойкостью к воздействию ПЧР. Тем самым, были решены проблемы разрядной активности, термомеханических перемещений и ремонтпригодности статоров.

Показано, что при увеличении воздействующей температуры наблюдается увеличение скорости снижения упругих свойств материалов пазового уплотнения и сопротивления коронозащитных покрытий, что может приводить к интенсификации разрядных процессов в изоляции в процессе эксплуатации. Для оценки уровня температур при переходе изготовления статоров от технологии Global VPI к Resin Rich, авторами выполнен сравнительный расчет теплового состояния статоров турбогенераторов мощностью 160 МВт, который показал сопоставимый уровень теплового состояния, что обеспечивается использованием материалов изоляции с теплопроводностью, повышенной примерно на 30% относительно стандартно применяемой для технологии Resin Rich. Дальнейшее снижение воздействующих температур может обеспечить условия для повышения надежности турбогенераторов и может быть реализовано путем внедрения высокопроводящих электроизоляционных материалов, в частности, корпусной изоляции нового поколения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Мазалов А.Б., Зеленина Л.С., Ендальцев Е.П., Фокин Н.И., Барудкин В.В., Тарасов Д.С. Опыт применения аддитивных технологий для изготовления деталей камеры сгорания ГТЭ-170. Газотурб. технол. 2021, N 3, с. 12–16.
- [2] Кириченко Р.Е., Черкасова М.Г., Сагитов А.Ф., Козакевич А.А. Основные направления модернизации турбины ГТЭ-170. Газотурб. технол. 2020, N 5, с. 36–40.
- [3] Хуторецкий Г.М. Турбогенераторы единой унифицированной серии мощностью 160–800 мВт, 3000 об/мин. Академик Я.Б. Данилевич. Избранные труды: Сборник. СПб. 2021, с. 92–97.
- [4] Ройтгарц М.Б., Антонюк О.В., Карташова Т.Н. ПОВЫШЕНИЕ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ // Новое в Российской Электроэнергетике. 2013. № 5. С. 5–17.
- [5] Андреев А.М., Таджибаев А.И., Азизов А.Ш., Костельов А.М., Степанов А.А., Назаров Г.А., Иванов С.А. Обеспечение надежности турбогенераторов на основе контроля разрядных процессов в электрической изоляции статорной обмотки. Надеж. и безопас. энерг.. 2022. 15, N 3, с. 199–204.
- [6] Корчагин Н.Ю., Серебрянников С.В., Серебрянников С.С., Черкасов А.П. Контроль остаточных свойств изоляции турбогенератора. 18 Международная конференция "Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты", Алушта, 21-25 сент., 2020: Труды МКЭЭЭ – 2020. Нац. исслед. ун-т "МЭИ". М., 2020, с. 18–23.
- [7] Howard W. DETERIORATION MECHANISMS IN RECENT AIR COOLED TURBINE GENERATORS, Proceedings of PWR2006: ASME Power, 2006, pp. 1–7.

[8] Шаров Ю.В., Бинько Г.Ф., Беляков В.В., Веницкий Ю.Д., Голоднова О.С., Купчиков Т.В., Федотов М.В., Астанин А.А., Тарасов В.М., Миляев Р.Г., Пичугин Д.Е., Шумов П.В. Цифровизация контроля текущего состояния и предиктивной диагностики турбогенераторов на электростанциях. Энергия един. сети. 2019-2020, № 6, с. 18–30.

[9] Stone G.C. *Electrical Insulation for Rotating Machines*, IEEE Press-Wiley, 2018, 2nd ed., 672 P.

[10] Montanari G.C., Seri P.A. Partial Discharge–Based Health Index for Rotating Machine Condition Evaluation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2018, vol. 34, № 2, pp. 17–23.

[11] Brüttsch R., Hillmer T. “Corona Protection in Rotating High Voltage Machines,” *INDUCTICA 2006 Conference*, Berlin.

[12] Андреев И.А. Разработка методики идентификации дефектов изоляции электроэнергетического оборудования по статистическим характеристикам частичных разрядов: диссертация на соискание степени кандидата технических наук: 05.09.02

[13] Андреев А.М., Таджикибеков А.И., Азизов А.Ш., Костельов А.М., Степанов А.А., Назаров Г.А., Иванов С.А. "Обеспечение надежности турбогенераторов на основе контроля разрядных процессов в электрической изоляции статорной обмотки". Надежность и безопасность энергетики, 2022 г. Т. 15. № 3. С. 199–204.

[14] ENHANCED CALCULATION AND DIMENSIONING OF OUTER CORONA PROTECTION SYSTEMS IN LARGE ROTATING MACHINES Siemens AG, Germany. The 19<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, 2015.

[15] Belko V.O., Petrenya Y.K., Andreev A.M., Kosteliov A.M., Roitgarz M.B. "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800–802.

[16] Andreev A.M., Andreev I.A., Belko V.O., Reznik A.S., Smirnov A.N., Stepanov A.A. Modelling of Electrical Discharge Processes for Optimization of Corona Protection System of High Voltage Rotating Machines Insulation. *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2* (46), 2020. С. 33–42. DOI: 10.5281/zenodo.3898227

[17] Lévesque M., Hudon C. Insulation Degradation Analysis of Stator Bars Subjected to Slot Partial Discharges //2017 Electrical Insulation Conference, Ottawa, Canada, 2017, pp. 479–485.

[18] Kumada A., Onishi D, Morita Y., Boggs S.A. Surface corona inception on stress grading system //INSUCON2017 – 13<sup>th</sup> International Electrical Insulation Conference, Birmingham, UK, 2017, 11 P.

[19] Akbari A., Rahimi M., Werle P., Borsi H. Fault Localization and Analysis for a Damaged Hydrogenerator and a Proposal to Improve the Standard for Generator Commissioning Tests, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2021, vol. 36, №. 3, pp. 19–26.

[20] Xia Y. Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017, vol. 20, № 1, pp. 42–53.

[21] Stone G.C., Culbert I., Boulter E.A., Dhirani H. (2014). *Electrical Insulation for Rotating Machines*. 371 P. DOI: 10.1002/9781118886663

[22] «Новые материалы и системы изоляции высоковольтных электрических машин», В.М. Пак, С.Г. Трубочев, Москва, Энергоиздат, 2007, 415 С.

[23] Liese M. Vibration Sparking, an Ignored Damage Mechanism of High Voltage Windings, *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*, pp. 1–6.

[24] Moore B., et al. Stator Winding Failure due to Spark Erosion, 5<sup>th</sup> EPRI Conf. Turbine Generator Technology, 2008, Concord, pp. 1–7.

[25] Moore B., Khazanov A. Degradation in Generator Stator Bars due to Spark Erosion and Partial Discharge Damage, 2010 IEEE Conf., pp. 1–7.

[26] Maudy W.H. Deterioration Mechanisms in Recent Air Cooled Turbine Generators, *Proc. ASME Power*, Atlanta, 2006, pp. 1–7.

[27] Маннанов Э.Р., Степанов А.А., Костельов А.М., Андреев А.М. Исследование повреждений па- зовых полупроводящих покрытий статорных обмоток турбогенераторов в условиях эксплуатационных воздействий // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 2. С. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29203>

[28] Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Chernyshov D.A. "Investi- gation of Mechanical Characteristics of Pressuring Materials of Generators Stator Winding in Thermal Aging Process," 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICon- Rus), 2023, pp.. (в печати).

[29] Fedotov N.A., Shikova T.M., Belko V.O., Reznik A.S., Kostelov A.M., Mannanov E.R. Causes of Resist- ance Decrease of Corona Protection Materials in Thermal Aging Process , 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2023, pp. DOI: (in print)

[30] Маннанов Э.Р., Филин А.Г. ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ СТАТОРНЫХ ОБМОТОК ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ // Глобаль- ная энергия. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49. DOI: [10.18721/JEST.27203](https://doi.org/10.18721/JEST.27203)

[31] Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E.R. Mannanov, A.G. Filin, V.O. Belko // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2021 IEEE NWRussia. – 2021. – pp. 1193–1196. DOI: [10.1109/EIConRus51938.2021.9396705](https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396705)

[32] Маннанов Э.Р. Разработка численной модели для расчета коэффициента эффективной тепло- проводности системы изоляции статорной обмотки турбогенераторов / Маннанов Э.Р. // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разрабо- ток, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли. 2020, С. 108–114.

[33] Mannanov E.R., Kostelov A.M., Belko V.O., Fedotov N.A., Govor V.M. "Investigation of the Ther- mophysical Processes in Highly Thermally Conductive Composite Material with a Complex Structure," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 1026–1029, DOI: [10.1109/EIConRus54750.2022.9755505](https://doi.org/10.1109/EIConRus54750.2022.9755505)

[34] Кучинський К.А., Крамарський В.А., Худяков А.В. Экспериментальное исследование тепло- обмена в аксиальных каналах зубцов сердечника статора турбогенератора. Праці Ін-ту електродинам. НАН України. 2019, N 53, с. 35–38.

[35] Филин А.Г., Голубков В.Д., Шишкина И.А. Оптимизация расчетных алгоритмов определения теплового состояния активных частей турбогенератора. Материаловед. Энерг. 2021. 27, N 4, с. 5–18.

[36] Рыжов В.В., Дергачев П.А., Курбатова Е.П., Молоканов О.Н., Курбатов П.А. Построение трех- мерной тепловой модели статора турбогенератора с учетом газодинамики. Вестн. МЭИ. 2021, N 5, с. 75–82.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МАННАНОВ Эмиль Рамилевич** – инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые маши- ны», без степени.

E-mail: [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

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

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

E-mail: [Kostelov\\_AM@power-m.ru](mailto:Kostelov_AM@power-m.ru)

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

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

E-mail: [Filin\\_AG@power-m.ru](mailto:Filin_AG@power-m.ru)

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

**ЖЕЛЕЗНЯК Владимир Николаевич** – начальник отдела расчетов, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: Zheleznyak\_VN@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9499-385X>

## REFERENCES

- [1] **A.B. Mazalov, L.S. Zelenina, Ye.P. Yendaltsev, N.I. Fokin, V.V. Barudkin, D.S. Tarasov**, Opyt primeneniya additivnykh tekhnologiy dlya izgotovleniya detaley kamery sgoraniya GTE-170. *Gazoturb. tekhnol.* 2021, N 3, s. 12–16.
- [2] **R.Ye. Kirichenko, M.G. Cherkasova, A.F. Sagitov, A.A. Kozakevich**, Osnovnyye napravleniya modernizatsii turbiny GTE-170. *Gazoturb. tekhnol.* 2020, N 5, s. 36–40.
- [3] **G.M. Khutoretskiy**, Turbogeneratory yedinoi unifikatsionnoy serii moshchnostyu 160-800 mVt, 3000 ob/min. *Akademik Ya. B. Danilevich. Izbranyne trudy: Sbornik.* SPb. 2021, s. 92–97.
- [4] **M.B. Roytgarts, O.V. Antonyuk, T.N. Kartashova**, POVYShENIE YeDINICHNOY MOShchNOSTI TURBOGENERATOROV S ISPOLZOVANIEM NOVYKh MATERIALOV I TEKhNOLOGIY // *Novoye v Rossiyskoy Elektroenergetike.* 2013. № 5. S. 5–17.
- [5] **A.M. Andreyev, A.I. Tadzhibayev, A.Sh. Azizov, A.M. Kostelov, A.A. Stepanov, G.A. Nazarov, S.A. Ivanov**, Obespecheniye nadezhnosti turbogeneratorov na osnove kontrolya razryadnykh protsessov v elektricheskoy izolyatsii statornoy obmotki. *Nadezh. i bezopas. energ.* 2022. 15, N 3, s. 199–204.
- [6] **N.Yu. Korchagin, S.V. Serebryannikov, S.S. Serebryannikov, A.P. Cherkasov**, Kontrol ostatochnykh svoystv izolyatsii turbogeneratorsa. 18 Mezhdunarodnaya konferentsiya "Elektromekhanika, elektrotekhnologii, elektrotekhnicheskiye materialy i komponenty", Alushta, 21-25 sent., 2020: *Trudy MKEEE – 2020. Nats. issled. un-t "MEI". M.. 2020, s. 18-23.*
- [7] **W. Howard**, DETERIORATION MECHANISMS IN RECENT AIR COOLED TURBINE GENERATORS, *Proceedings of PWR2006: ASME Power, 2006*, pp. 1–7.
- [8] **Yu.V. Sharov, G.F. Binko, V.V. Belyakov, Yu.D. Vinitskiy, O.S. Golodnova, T.V. Kupchikov, M.V. Fedotov, A.A. Astanin, V.M. Tarasov, R.G. Milyayev, D.Ye. Pichugin, P.V. Shumov**, Tsifrovizatsiya kontrolya tekushchego sostoyaniya i prediktivnoy diagnostiki turbogeneratorov na elektrostantsiyakh. *Energiya yedin. seti.* 2019-2020, N 6, s. 18–30.
- [9] **G.C. Stone**, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, IEEE Press-Wiley, 2018, 2nd ed., 672 P.
- [10] **G.C. Montanari, P.A. Seri**, Partial Discharge–Based Health Index for Rotating Machine Condition Evaluation, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2018, vol. 34, № 2, pp. 17–23.
- [11] **R. Brüttsch, T. Hillmer**, "Corona Protection in Rotating High Voltage Machines," *INDUCTICA 2006 Conference*, Berlin.
- [12] **I.A. Andreyev**, Razrabotka metodiki identifikatsii defektov izolyatsii elektroenergeticheskogo oborudovaniya po statisticheskim kharakteristikam chastichnykh razryadov: dissertatsiya na soiskaniye stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.09.02
- [13] **A.M. Andreyev, A.I. Tadzhibekov, A.Sh. Azizov, A.M. Kostelov, A.A. Stepanov, G.A. Nazarov, S.A. Ivanov**, "Obespecheniye nadezhnosti turbogeneratorov na osnove kontrolya razryadnykh protsessov v elektricheskoy izolyatsii statornoy obmotki". *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*, 2022 g-T.15-№3 C. 199–204.
- [14] ENHANCED CALCULATION AND DIMENSIONING OF OUTER CORONA PROTECTION SYSTEMS IN LARGE ROTATING MACHINES Siemens AG, Germany. *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, Czech Republic, 2015.
- [15] **V.O. Belko, Y.K. Petrenya, A.M. Andreev, A.M. Kosteliov, M.B. Roitgarz**, "Numerical Simulation of Discharge Activity in HV Rotating Machine Insulation," *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 800–802.

- [16] **A.M. Andreev, I.A. Andreev, V.O. Belko, A.S. Reznik, A.N. Smirnov, A.A. Stepanov**, Modelling of Electrical Discharge Processes for Optimization of Corona Protection System of High Voltage Rotating Machines Insulation. *PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE* 2 (46), 2020. С. 33–42. DOI: 10.5281/zenodo.3898227
- [17] **M. Lévesque, C. Hudon**, Insulation Degradation Analysis of Stator Bars Subjected to Slot Partial Discharges // 2017 Electrical Insulation Conference, Ottawa, Canada, 2017, pp. 479–485.
- [18] **A. Kumada, D. Onishi, Y. Morita, S.A. Boggs**, Surface corona inception on stress grading system // *INSUCON2017 – 13<sup>th</sup> International Electrical Insulation Conference*, Birmingham, UK, 2017, 11 P.
- [19] **A. Akbari, M. Rahimi, P. Werle, H. Borsi**, Fault Localization and Analysis for a Damaged Hydrogenerator and a Proposal to Improve the Standard for Generator Commissioning Tests, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2021, vol. 36, №. 3, pp. 19–26.
- [20] **Y. Xia**, Principles and Characteristics of Vibration Sparking in High Voltage Stator Slots, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017, vol. 20, № 1, pp. 42–53.
- [21] **G.C. Stone, I. Culbert, E.A. Boulter, H. Dhirani**, (2014). *Electrical Insulation for Rotating Machines*. 371 P. DOI: 10.1002/9781118886663
- [22] «Novyye materialy i sistemy izolyatsii vysokovoltnykh elektricheskikh mashin», V.M. Pak, S.G. Trubachev, Moskva, Energoizdat, 2007, 415 С.
- [23] **M. Liese**, Vibration Sparking, an Ignored Damage Mechanism of High Voltage Windings, *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*, pp. 1–6.
- [24] **B. Moore, et al.**, Stator Winding Failure due to Spark Erosion, 5th EPRI Conf. Turbine Generator Technology, 2008, Concord, pp. 1–7.
- [25] **B. Moore, A. Khazanov**, Degradation in Generator Stator Bars due to Spark Erosion and Partial Discharge Damage, 2010 IEEE Conf., pp. 1–7.
- [26] **W.H. Maudy**, Deterioration Mechanisms in Recent Air Cooled Turbine Generators, *Proc. ASME Power*, Atlanta, 2006, pp. 1–7.
- [27] **E.R. Mannanov, A.A. Stepanov, A.M. Kostelov, A.M. Andreev**, Damage analysis for slot semiconducting coatings in turbogenerator stator windings under operating stresses, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 32–43, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29203>
- [28] **N.A. Fedotov, T.M. Shikova, V.O. Belko, A.M. Kostelov, E. R. Mannanov, D.A. Chernyshov**, "Investigation of Mechanical Characteristics of Pressuring Materials of Generators Stator Winding in Thermal Aging Process," 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2023, pp.. (v pechati).
- [29] **N.A. Fedotov, T.M. Shikova, V.O. Belko, A.S. Reznik, A.M. Kostelov, E.R. Mannanov**, Causes of Resistance Decrease of Corona Protection Materials in Thermal Aging Process, 2023 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2023, pp.. DOI: (in print)
- [30] **E.R. Mannanov, A.G. Filin**, Electrical insulation thermal state of turbine generators stator windings with air-cooling, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (02) (2021) 38–49, DOI: 10.18721/JEST.27203
- [31] Technique for calculating the thermal conductivity coefficient of the insulation system / E.R. Mannanov, A.G. Filin, V.O. Belko // *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, 2021 IEEE NW Russia. – 2021. – pp. 1193–1196. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396705
- [32] **E.R. Mannanov**, Razrabotka chislennoy modeli dlya rascheta koeffitsiyenta effektivnoy teploprovodnosti sistemy izolyatsii statornoy obmotki turbogeneratorov / Mannanov E.R. // *Sbornik rabot laureatov mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye toplivno-energeticheskoy i dobyvayushchey otrasli*. 2020, S.108-114.
- [33] **E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, V.O. Belko, N.A. Fedotov, V.M. Govor**, "Investigation of the Thermophysical Processes in Highly Thermally Conductive Composite Material with a Complex Structure," 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2022, pp. 1026–1029, DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755505

[34] **K.A. Kuchinskiy, V.A. Kramarskiy, A.V. Khudyakov**, Eksperimentalnoye issledovaniye teploobmena v aksialnykh kanalakh zubtsov serdechnika statora turbogeneratora. Pratsi In-tu yelektroinam. NAN Ukraini. 2019, N 53, s. 35–38.

[35] **A.G. Filin, V.D. Golubkov, I.A. Shishkina**, Optimizatsiya raschetnykh algoritmov opredeleniya teplovo-go sostoyaniya aktivnykh chastey turbogeneratora. Materialoved. Energ. 2021. 27, N 4, s. 5–18.

[36] **V.V. Ryzhov, P.A. Dergachev, Ye.P. Kurbatova, O.N. Molokanov, P.A. Kurbatov**, Postroyeniye trekhmer-noy teplovo-y modely statora turbogeneratora s uchetom gazodinamiki. Vestn. MEI. 2021, N 5, s. 75–82.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

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

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

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

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

E-mail: Kostelov\_AM@power-m.ru

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

**Alexei G. FILIN** – JSC “Power machines”.

E-mail: Filin\_AG@power-m.ru

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

**Vladimir N. ZHELEZNYAK** – JSC “Power machines”.

E-mail: Zheleznyak\_VN@power-m.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9499-385X>

Поступила: 04.07.2023; Одобрена: 11.09.2023; Принята: 15.09.2023.

Submitted: 04.07.2023; Approved: 11.09.2023; Accepted: 15.09.2023.

# Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29306>



*Д.П. Ерутин* ✉, *А.А. Попович*, *В.Ш. Суфияров*

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

✉ [erutin@inbox.ru](mailto:erutin@inbox.ru)

## **ВЛИЯНИЕ УГЛА ПОВОРОТА СКАНИРОВАНИЯ НА ПЛОТНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА 1СР/МЕДЬ В ПРОЦЕССЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

*Аннотация.* В работе представлены результаты исследования образцов, полученных с помощью селективного лазерного плавления смеси порошков железного сплава 1СР и чистой меди при использовании различных значений угла поворота сканирования. Исходный порошковый материал был сформирован из порошка железного сплава 1СР и 10 массовых процентов порошка чистой меди путем смешивания. Образцы композиционного материала были получены с помощью установки селективного лазерного плавления с применением варьирования угла поворота сканирования. С помощью оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии были получены данные о макроструктуре, фазовом составе и степени аморфизации образцов. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего исследования и разработки технологии получения композитных магнитомягких материалов с помощью селективного лазерного плавления.

*Ключевые слова:* Селективное лазерное плавление, аморфная фаза, магнитомягкий сплав, стратегия сканирования, аддитивное производство.

*Благодарности:* Грант РФФИ "Послойный синтез аморфных и нанокристаллических композиционных материалов на базе Fe и Co, особенности формируемых структур и свойства", №21-73-10008

*Для цитирования:*

Ерутин Д.П., Попович А.А., Суфияров В.Ш. Влияние угла поворота сканирования на плотность композиционного материала 1СР/медь в процессе селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29306>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29306>*D.P. Erutin* ✉, *A.A. Popovich*, *V.S. Sufiiarov*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia✉ [erutin@inbox.ru](mailto:erutin@inbox.ru)

## EFFECT OF SCANNING ANGLE ON THE DENSITY OF 1CP/COPPER SELECTIVE LASER MELTED COMPOSITE MATERIAL

*Abstract.* In this work, results of the investigation of selective laser melted samples of a mixture of 1CP and copper powders with varying scanning angle are presented. The initial powder material was formed by mixing 1CP iron alloy powder and 10 wt% pure copper powder. The samples of the composite material were obtained using a selective laser melting setup with a varying scanning angle. Macrostructure, phase composition and amorphization degree data of the samples were obtained using optical microscopy, X-Ray diffraction analysis and differential scanning calorimetry. The investigation results can be used for further research and development of the technology of soft-magnetic composites manufacturing via selective laser melting.

*Keywords:* Selective laser melting, amorphous phase, soft-magnetic alloy, scanning strategy, additive manufacturing.

*Acknowledgements:* Grant of the Russian Science Foundation “Layer-by-layer synthesis of amorphous and nanocrystalline composite materials based on Fe and Co, features of the formed structures and properties”, No. 21-73-10008

*Citation:*

D.P. Erutin, A.A. Popovich, V.S. Sufiiarov, Effect of scanning angle on the density of 1CP/copper selective laser melted composite material, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 90–99, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29306>

**Введение.** Нанокристаллические и аморфные сплавы на основе железа являются одними из наиболее перспективных магнитомягких материалов в настоящее время благодаря своим электрическим и магнитным свойствам [1, 2]. В настоящее время в промышленном производстве металлических стекол на основе железа и других элементов широко используются такие методы, как прямое литье [3, 4] и термопластическое формование [5–12], однако существует множество ограничений, связанных с геометрией получаемых изделий и низкой склонностью материала к аморфизации, которые могут быть преодолены с помощью технологии селективного лазерного плавления. Послойное плавление слоев порошка толщиной 20–60 мкм позволяет достичь скорости охлаждения до 108 К/с, что дает возможность использовать селективное лазерное плавление для получения металлического стекла сложной геометрической конфигурации. Однако получение бездефектной структуры материала на основе железа с помощью селективного лазерного плавления затруднено за счет чрезвычайно высокого уровня внутренних напряжений в материале и технологических особенностей процесса [13–18]. Подбор оптимальных параметров процесса и применение стратегий множественного сканирования с использованием различных паттернов позволяют значительно улучшить качество получаемых изделий, но чаще всего не позволяют полностью избавиться от негативного для целевой изотропии магнитных свойств влияния внутренних напряжений.

Одним из возможных путей дальнейшего улучшения качества металлического материала, полученного селективным лазерным плавлением, является добавление в исходный порошковый материал легкоплавкого элемента или многоэлементного порошка. Основная идея подобного подхода заключается в заполнении трещин матричного материала легкоплавкой вторичной фазой. Кроме того, присутствие вторичного материала может интенсифицировать охлаждение матрицы путем частичного поглощения поступившего в нее тепла и влиять на склонность матрицы к аморфизации за счет диффузии – оба представленных фактора способствуют получению аморфной структуры материала.

Для улучшения качества аморфно-нанокристаллических образцов, получаемых в процессе селективного лазерного плавления, ученые используют различные подходы, такие как выбор оптимальных параметров процесса и применение стратегий множественного сканирования по различным паттернам, что позволяет значительно улучшить качество образцов, но не позволяет полностью преодолеть влияние внутренних напряжений, что является негативным фактором для целевой изотропии магнитных и механических свойств. Помимо качества образцов, одним из важнейших факторов при получении объемных металлических стекол является степень аморфизации получаемого материала. Формирование материала с максимальным содержанием аморфной фазы предполагает подавление процесса кристаллизации как на этапе охлаждения расплава, так и при вторичном нагреве затвердевшего объема материала [1].

В настоящей работе для получения композитного материала с медью методом селективного лазерного плавления был выбран аморфно-нанокристаллический сплав 1СР (FeSiB). Целью данной работы было исследование влияния угла поворота сканирования на макроструктуру и фазовый состав композитного материала, полученного с помощью технологии селективного лазерного плавления

### Материалы и методы исследования

В представленной работе были использованы исходные порошки железного сплава 1СР [1] и чистой меди. Смесь порошка 1СР, который был получен при помощи метода газовой атомизации [21], обладающего средним размером частиц 41,8 мкм и 10 масс. % порошка меди со средним размером частиц 26,9 мкм была приготовлена путем смешивания порошков в гравитационном смесителе в течение 24 ч (рис. 1).

Насыпная плотность порошкового материала была измерена путем помещения порошка в воронку, из которой происходило его истекание в емкость объемом 25 см<sup>3</sup>. Насыпная плотность определялась путем взвешивания порошка в емкости, значение исследуемой величины составило 3,97 г/см<sup>3</sup>.

Гранулометрический состав порошкового материала был определен лазерной дифракцией на приборе Analysette 22 NanoTec plus (Fritsch, Германия) в общем диапазоне измерения 0,01–2000 мкм. Среднее значение размера частиц смеси составляет 41,2 мкм.

Макроструктура образцов была исследована с помощью оптического микроскопа Leica DM15000. Анализ изображения был проведен при помощи программного обеспечения ImageJ.

Микроструктура порошка и полученных образцов была исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Mira3 LMU. Травление образцов проводилось в 25-% растворе азотной кислоты в воде.

Температуры фазовых превращений и энтальпии кристаллизации аморфной фазы матричного материала исследовались на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) Q2000 (TA Instruments). Образцы были нагреты в потоке инертного газа (Ar) до температуры 1000°С со скоростью нагрева 20°С/мин, после чего был проведен повторный нагрев охлажденных образцов до той же температуры. Для композитного образца, содержащего медь, энтальпия кристаллизации аморфной фазы матрицы 1СР определялась как увеличенная на 10% энтальпия образца.

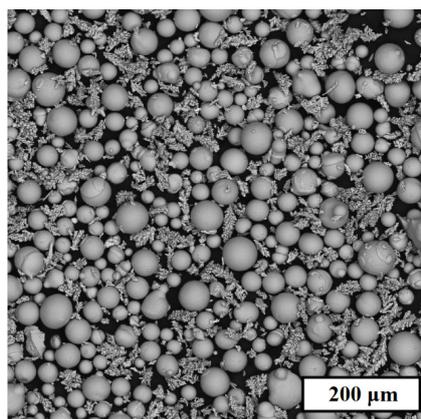


Рис. 1. Смесь порошков 1CP и меди после перемешивания в гравитационном смесителе в течение 24 ч

Fig. 1. Mixture of 1CP and copper powders after mixing in a gravity mixer for 24 hours

Данные о фазовом составе были получены с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance (XRD) с использованием медного излучения  $K\alpha$  ( $1\ 1/4\ 1,5418\ \text{Å}$ ).

Образцы были получены с помощью системы селективного лазерного плавления SLM280HL, оснащенной YLR-лазером с длиной волны 1070 мкм и фокусным размером 80 мкм в атмосфере азота.

#### Результаты исследования

3 образца геометрии прямоугольной призмы (5 x 10 x 5 мм) были успешно изготовлены в атмосфере азота. Используемые для изготовления образцов параметры селективного лазерного плавления представлены в табл. 1. Сканирование каждого последующего слоя образцов предполагало поворот траектории движения каждого прохода лазером на угол  $\alpha$  относительно предыдущего слоя. Процесс сканирования каждого из образцов предполагал сдвиг каждого прохода сканирования, производимый после поворота, на расстояние, равное половине шага сканирования  $h$  в направлении, перпендикулярном траектории движения лазера.

Таблица 1

**Режимы селективного лазерного плавления, использованные для получения образцов**  
( $P$  – мощность лазера,  $V$  – скорость сканирования,  $h$  – расстояние между проходами лазера,  
 $t$  – толщина слоя порошка,  $\alpha$  – угол поворота сканирования)

Table 1

**Selective laser melting parameter presets used to obtain samples ( $P$  – laser power,  
 $V$  – scanning speed,  $h$  – hatch distance,  $t$  – powder layer thickness,  $\alpha$  – scanning angle)**

Образец	$P$ , Вт	$V$ , мм/с	$h$ , мм	$t$ , мм	$\alpha$ , °
1	90	1200	0,08	0,02	0
2	90	1200	0,08	0,02	45
3	90	1200	0,08	0,02	67

Изображения макроструктуры образцов, полученные с помощью оптического микроскопа, представлены на рис. 1.

Полученные изображения свидетельствуют о том, что в структуре полученного композиционного материала отсутствуют макротрещины. Результаты оценки пористости были получены с помощью анализа изображений и представлены в табл. 2.

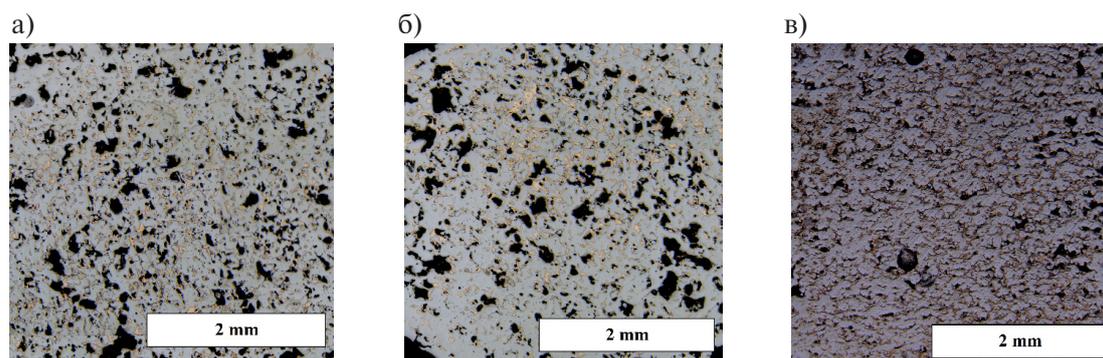


Рис. 2. Макроструктура образцов 1–3 (а–в)  
 Fig. 2. Macrostructure of samples 1–3 (a–c)

Таблица 2

**Результаты оценки пористости полученных образцов**

Table 2

**Results of porosity assessment of the obtained samples**

Образец	Пористость, %
1	12,85
2	12,05
3	4,36

Данные о пористости полученных образцов свидетельствуют о том, что увеличение угла поворота сканирования в исследованном диапазоне приводит к формированию более плотной структуры материала. Процент пористости образца 3, характеризующегося применением наибольшего угла поворота сканирования из исследованного диапазона, примерно втрое меньше процента пористости образца, полученного с нулевым углом поворота сканирования.

Фазовый состав образцов был исследован с помощью рентгеноструктурного анализа (рис. 3).

Фазовый состав образцов характеризуется присутствием раствора  $\alpha$ -Fe и бориды железа  $Fe_2B$ . Дифракционная образцов также содержит пики, связанные с кристаллической медью. Отсутствие аморфного гало на дифрактограмме свидетельствует о малом или нулевом содержании аморфной фазы во всех образцах. Энтальпия кристаллизации аморфной фазы образцов была исследована с помощью ДСК (рис. 4), численные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии образцов**

Table 3

**Differential scanning calorimetry results of the samples obtained**

Образец	Энтальпия кристаллизации аморфной фазы, Дж/г
1	2,50
2	1,17
3	1,75

Сравнение энтальпий кристаллизации аморфной фазы в образцах позволяет сделать вывод о том, что наибольшей степенью аморфизации обладает матрица образца, полученного с нулевым

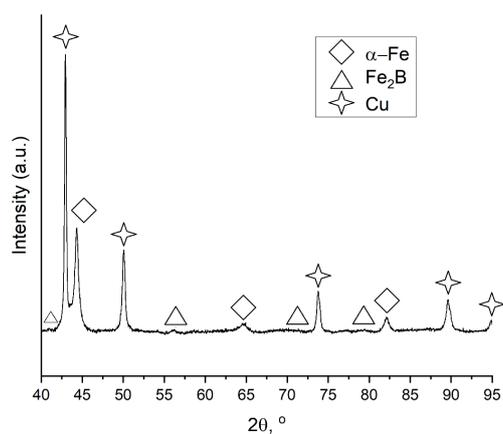


Рис. 3. Дифрактограмма образца 1 (идентична для всех полученных образцов)  
 Fig. 3. X-Ray diffraction pattern of sample 1 (identical for all the samples obtained)

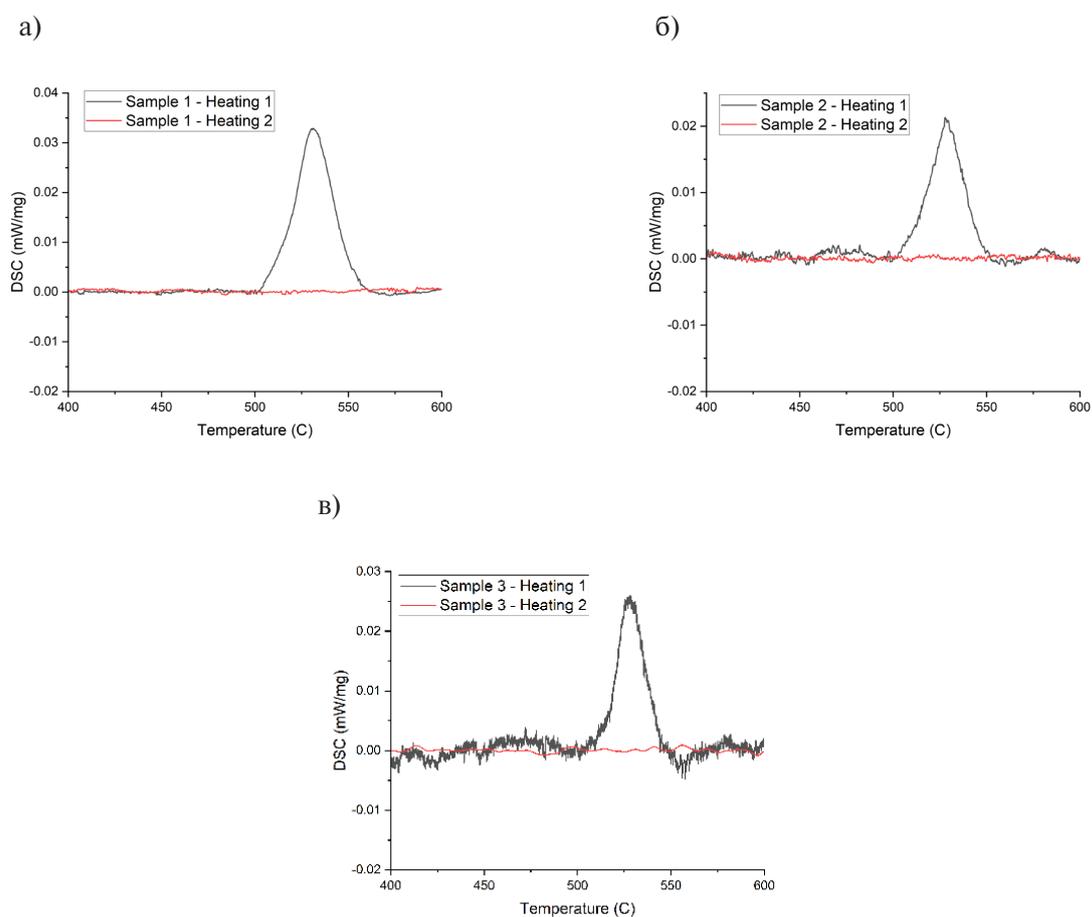


Рис. 4. Кривые ДСК образцов 1–3 (а–в)  
 Fig. 4. DSC curves of samples 1–3 (a–c)

углом поворота сканирования, что может быть связано с уменьшенным термическим влиянием проходов последующего слоя за счет их расположения над менее нагретыми участками предыдущего слоя. Однако, величина энтальпии кристаллизации аморфной фазы в образцах не уменьшается монотонно с увеличением угла поворота сканирования: образец, полученный при значении угла поворота, равном  $67^\circ$ , обладает большей степенью аморфизации по сравнению с образцом, полученным с поворотом сканирования на  $45^\circ$ . Оптимальным с точки зрения совокупности уровня пористости и степени аморфизации является образец 3, полученный с использованием поворота сканирования на  $67^\circ$ .

### Заключение

В ходе проведенного исследования были получены данные о макроструктуре и фазовом составе образцов композитного материала 1CP/Cu, произведенного с помощью селективного лазерного плавления. Результаты исследования свидетельствуют о том, что пористость образцов монотонно уменьшается с увеличением угла поворота сканирования. Величина энтальпии кристаллизации аморфной фазы в матрице образцов не демонстрирует монотонности: наибольшей степенью аморфизации обладает матрица образца, полученного с нулевым углом поворота сканирования, однако, образец, полученный при использовании поворота сканирования на  $67^\circ$ , обладает большей степенью аморфизации относительно образца, полученного при применении поворота сканирования на  $45^\circ$ . Совокупность данных о пористости и степени аморфизации матрицы образцов позволяет сделать вывод о том, что в исследуемом интервале величины угла поворота сканирования оптимальным значением является  $67^\circ$ .

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sufiiarov V., Erutin D., Kantuykov A., Borisov E., Popovich A., Nazarov D. Structure, Mechanical and Magnetic Properties of Selective Laser Melted Fe-Si-B Alloy, *Materials*. 15 (12) (2022) 4121.
- [2] Erutin D., Borisov E., Popovich A., Sufiiarov V. Magnetic anisotropy of a selective laser melted Fe-Si-B alloy, *Proceedings of the 2022 8<sup>th</sup> Asia Conference on Mechanical Engineering and Aerospace Engineering, Wuhan*. 2361 (2022) 012011.
- [3] Schroers J., Paton N. Amorphous metal alloys form like plastics, *Advanced Materials and Processes*. 164 (2006) 61–63.
- [4] Schroers J. Processing of bulk metallic glass, *Advanced Materials*. 22 (2010) 1566–1597.
- [5] Frey M., Wegner J., Neuber N., Reiplinger B., Bochtler B., Adam B., Ruschel L., Riegler S.S., Jiang H.R., Kleszczynski S., Witt G., Busch R. Thermoplastic forming of additively manufactured Zr-based bulk metallic glass: A processing route for surface finishing of complex structures, *Materials & Design*. 198 (2021) 109368.
- [6] Song S.M., Liao Y.C., Li T.H., Lee C.K., Tsai P.H., Jang J.S.C., Huang J.C. Thermoplastic deformation behavior of a Fe-based bulk metallic glass within the supercooled liquid region, *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (2) (2019) 1907–1914.
- [7] Li J., Li C., Wang S., Wang H., Kou S. Thermal processing map and thermoplastic forming map of Zr-based bulk metallic glass in the supercooled liquid region, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 570 (2021) 121008.
- [8] Savaedi Z., Motallebi R., Mirzadeh H., Malekan M. Superplasticity of bulk metallic glasses (BMGs): A review, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 583 (2022) 121503.
- [9] Li N., Xia T., Heng L.P., Liu L. Superhydrophobic Zr-based metallic glass surface with high adhesive force, *Applied Physics Letters*. 102 (2013) 251603.

- [10] **Chen W., Liu Z., Robinson H.M., Schroers J.** Flaw tolerance vs. performance: a tradeoff in metallic glass cellular structures, *Acta Materialia*. 73 (2014) 259–274.
- [11] **Liu Z., Chen W., Carstensen J., Ketkaew J., Mota R.M.O., Guest J.K., Schroers J.** 3D metallic glass cellular structures, *Acta Mater.* 105 (2016) 35–43.
- [12] **Li N., Li D.J., Liu L.** Correlation between flow characteristics and interfacial friction behaviour of a Zr-based metallic glass during micro-extrusion, *Philosophical Magazine*. 93 (2013) 1859–1872.
- [13] **Safia A., Rima D., Nouredine F.** Effect of the Laser Scan Rate on the Microstructure, Magnetic Properties, and Microhardness of Selective Laser-Melted FeSiB, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 31 (2018) 3565–3567.
- [14] **Nam Y.G., Koo B., Chang M.S., Yan S., Yu J., Park Y.H., Jeong J.W.** Selective laser melting vitrification of amorphous soft magnetic alloys with help of double-scanning-induced compositional homogeneity, *Materials Letters*. 261 (2020) 1–4.
- [15] **Zou Y., Wu Y., Li K., Tan C., Qiu Z., Zeng D.** Selective laser melting of crack-free Fe-based bulk metallic glass via chessboard scanning strategy, *Materials Letters*. 272 (2020) 127824.
- [16] **Jiang Q., Zhang P., Jie T., Zhishui Y., Tian Y., Ma S., Wu D.** Influence of the microstructure on mechanical properties of SLM additive manufacturing Fe-based bulk metallic glasses, *Journal of Alloys and Compounds*. 894 (2021) 162525.
- [17] **Jung H.Y., Choi S.J., Konda S.J., Mihai S., Sergio S., Yi S., Uta K., Kim D.H., Kim K.B., Jürgen E.** Fabrication of Fe-based bulk metallic glass by selective laser melting: A parameter study, *Materials and Design*. 86 (2015) 703–708.
- [18] **Żrodowski L., Wysocki B., Wróblewski R.** New approach to amorphization of alloys with low glass forming ability via selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*. 771 (2019) 769–776.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЕРУТИН Данил Петрович** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: erutin@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2797-0316>

**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>

**СУФИЯРОВ Вадим Шамилевич** – ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

### REFERENCES

- [1] **V. Sufiiarov, D. Erutin, A. Kantjukov, E. Borisov, A. Popovich, D. Nazarov,** Structure, Mechanical and Magnetic Properties of Selective Laser Melted Fe-Si-B Alloy, *Materials*. 15 (12) (2022) 4121.
- [2] **D. Erutin, E. Borisov, A. Popovich, V. Sufiiarov,** Magnetic anisotropy of a selective laser melted Fe-Si-B alloy, *Proceedings of the 2022 8<sup>th</sup> Asia Conference on Mechanical Engineering and Aerospace Engineering, Wuhan*. 2361 (2022) 012011.

- [3] **J. Schroers, N. Paton**, Amorphous metal alloys form like plastics, *Advanced Materials and Processes*. 164 (2006) 61–63.
- [4] **J. Schroers**, Processing of bulk metallic glass, *Advanced Materials*. 22 (2010) 1566–1597.
- [5] **M. Frey, J. Wegner, N. Neuber, B. Reiplinger, B. Bochtler, B. Adam, L. Ruschel, S.S. Riegler, H.R. Jiang, S. Kleszczynski, G. Witt, R. Busch**, Thermoplastic forming of additively manufactured Zr-based bulk metallic glass: A processing route for surface finishing of complex structures, *Materials & Design*. 198 (2021) 109368.
- [6] **S.M. Song, Y.C. Liao, T.H. Li, C.K. Lee, P.H. Tsai, J.S.C. Jang, J.C. Huang**, Thermoplastic deformation behavior of a Fe-based bulk metallic glass within the supercooled liquid region, *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (2) (2019) 1907–1914.
- [7] **J. Li, C. Li, S. Wang, H. Wang, S. Kou**, Thermal processing map and thermoplastic forming map of Zr-based bulk metallic glass in the supercooled liquid region, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 570 (2021) 121008.
- [8] **Z. Savaedi, R. Motallebi, H. Mirzadeh, M. Malekan**, Superplasticity of bulk metallic glasses (BMGs): A review, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 583 (2022) 121503.
- [9] **N. Li, T. Xia, L.P. Heng, L. Liu**, Superhydrophobic Zr-based metallic glass surface with high adhesive force, *Applied Physics Letters*. 102 (2013) 251603.
- [10] **W. Chen, Z. Liu, H.M. Robinson, J. Schroers**, Flaw tolerance vs. performance: a tradeoff in metallic glass cellular structures, *Acta Materialia*. 73 (2014) 259–274.
- [11] **Z. Liu, W. Chen, J. Carstensen, J. Ketkaew, R.M.O. Mota, J.K. Guest, J. Schroers**, 3D metallic glass cellular structures, *Acta Mater*. 105 (2016) 35–43.
- [12] **N. Li, D.J. Li, L. Liu**, Correlation between flow characteristics and interfacial friction behaviour of a Zr-based metallic glass during micro-extrusion, *Philosophical Magazine*. 93 (2013) 1859–1872.
- [13] **A. Safia, D. Rima, F. Nouredine**, Effect of the Laser Scan Rate on the Microstructure, Magnetic Properties, and Microhardness of Selective Laser-Melted FeSiB, *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. 31 (2018) 3565–3567.
- [14] **Y.G. Nam, B. Koo, M.S. Chang, S. Yan, J. Yu, Y.H. Park, J.W. Jeong**, Selective laser melting vitrification of amorphous soft magnetic alloys with help of double-scanning-induced compositional homogeneity, *Materials Letters*. 261 (2020) 1–4.
- [15] **Y. Zou, Y. Wu, K. Li, C. Tan, Z. Qiu, D. Zeng**, Selective laser melting of crack-free Fe-based bulk metallic glass via chessboard scanning strategy, *Materials Letters*. 272 (2020) 127824.
- [16] **Q. Jiang, P. Zhang, T. Jie, Y. Zhishui, Y. Tian, S. Ma, D. Wu**, Influence of the microstructure on mechanical properties of SLM additive manufacturing Fe-based bulk metallic glasses, *Journal of Alloys and Compounds*. 894 (2021) 162525.
- [17] **H.Y. Jung, S.J. Choi, G.P. Konda, S. Mihai, S. Sergio, S. Yi, K. Uta, D.H. Kim, K.B. Kim, E. Jürgen**, Fabrication of Fe-based bulk metallic glass by selective laser melting: A parameter study, *Materials and Design*. 86 (2015) 703–708.
- [18] **L. Żrodowski, B. Wysocki, R. Wróblewski**, New approach to amorphization of alloys with low glass forming ability via selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*. 771 (2019) 769–776.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Danil P. ERUTIN** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
 E-mail: erutin@inbox.ru  
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2797-0316>

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

**Vadim S. SUFIAROV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: [vadim.spbstu@yandex.ru](mailto:vadim.spbstu@yandex.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-4183>

**Поступила: 15.05.2023; Одобрена: 23.06.2023; Принята: 29.06.2023.**

**Submitted: 15.05.2023; Approved: 23.06.2023; Accepted: 29.06.2023.**

Научная статья

УДК 621.715.2, 66.040.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29307>



*А.Ю. Лаврентьев* ✉, *Д.Д. Какорин*, *Д.А. Барчуков*

Тверской государственный технический университет,  
г. Тверь, Россия

✉ [lavr\\_ay@mail.ru](mailto:lavr_ay@mail.ru)

## **ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ДИСКОВОГО НОЖА**

*Аннотация.* В статье описываются конструкции дисковых ножей для резки различных материалов, рассматриваются известные конструкции и способы производства дисковых ножей, их достоинства и недостатки. Цельные ножи из инструментальной стали дорогостоящие в производстве и не позволяют эффективно использовать материал. Целесообразно изготавливать дисковые ножи биметаллической конструкции. Предлагается способ изготовления дискового ножа, включающий сборку пакета заготовок с последующей пакетной наплавкой. Наплавка обеспечивает получение рабочего слоя из инструментальной стали. Термическая обработка и шлифовка заготовок по цилиндрической поверхности осуществляется в пакете. Пакет разделяется на отдельные изделия с помощью лазерной резки. Приведен обзор работ ряда авторов, посвященных исследованиям структуры и свойств инструментальных сталей после лазерного воздействия. Разработанный способ защищен патентом Российской Федерации.

*Ключевые слова:* дисковый нож, биметалл, наплавка, термическая обработка, лазерная резка, пакет заготовок.

*Для цитирования:*

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>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29307>*A.Yu. Lavrent'ev* ✉, *D.D. Kakorin*, *D.A. Barchukov*

Tver State Technical University, Tver, Russia

✉ [lavr\\_ay@mail.ru](mailto:lavr_ay@mail.ru)

## HIGH-PERFORMANCE METHOD OF MANUFACTURING A BIMETALLIC DISC KNIFE

*Abstract.* The article describes the designs of disc knives for cutting various materials, discusses the known designs and methods of production of disc knives, their advantages and disadvantages. Solid knives made of tool steel are expensive to manufacture and do not allow efficient use of the material. It is advisable to manufacture disk knives of bimetallic design. A method of manufacturing a disc knife is proposed, including the assembly of a package of blanks with subsequent batch surfacing. The surfacing provides a working layer of tool steel. Heat treatment and grinding of work pieces on a cylindrical surface is carried out in a package. The package is divided into individual products using laser cutting. The paper provides a review of several published works devoted to the study of the structure and properties of tool steels after laser exposure. The developed method is protected by a patent of the Russian Federation.

*Keywords:* disc knife, bimetal, surfacing, heat treatment, laser cutting, package of work pieces.

*Citation:*

A.Yu. Lavrent'ev, D.D. Kakorin, D.A. Barchukov, High-performance method of manufacturing a bimetallic disc knife, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 100–110, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29307>

**Введение.** Дисковый нож является многофункциональным режущим инструментом, применяющимся в различных отраслях современного производства, таких как, машиностроение, автомобилестроение, бумажно-целлюлозная, перерабатывающая и пищевая промышленности. С помощью дисковых ножей осуществляют раскрой материалов с различной структурой и свойствами.

Дисковый нож (рис. 1) представляет собой заточенный с одной или двух сторон диск (1), режущая кромка (2) которого расположена по периметру окружности, с отверстием (3) в центре, благодаря которому диск надежно закрепляется на оси вращения станка. Диаметр диска (D) зависит от области его применения и может составлять от 100 до 1000 мм.

Геометрия режущей кромки дискового ножа профилируется с учетом типа обрабатываемого материала. Выделяют диски с односторонней и двухсторонней заточкой, под прямым углом к боковым плоскостям диска и криволинейной заточкой.

Чаще всего дисковые ножи полностью изготавливаются из инструментальной стали. Такая конструкция обеспечивает достаточную прочность и жесткость инструмента, однако так же приводит к нерациональному использованию дорогостоящего материала и значительно повышает стоимость инструмента.

**Цель работы:** разработка эффективного и экономичного способа изготовления дискового ножа.

### Аналоги и прототипы

Описана конструкция дискового ножа, состоящего из корпуса и рабочего кольца, выполненного из инструментальной стали с твердостью 60 – 65 HRC. Рабочее кольцо дискового ножа изготавливают съемным с возможностью замены. Оно напрессовано на корпус и зафиксировано с

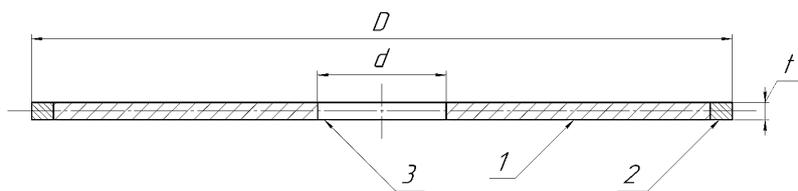


Рис. 1. Дисконный нож  
Fig. 1. Disc knife



Рис. 2. Дисконный нож с двумя режущими кромками  
Fig. 2. Disc knife with two cutting edges

помощью сварки. Торец рабочего кольца смещен в осевом направлении относительно корпуса на несколько миллиметров [1].

Такая конструкция дисконного ножа отличается высокой трудоемкостью изготовления рабочего кольца и сложностью соединения рабочего кольца, с корпусом. Выполнение сварки инструментальных сталей сопряжено с риском возникновения трещин в шве и околошовной зоне.

Также известен способ изготовления дисконного ножа (рис. 2), состоящего из основы – корпуса (1) и двух режущих кромок (2). Основу изготавливают из конструкционной стали, с двух сторон формируют пазы. Режущие кромки наплавляют сплавом 110X5M8B2C2TЮ [2].

Для такой конструкции дисконного ножа характерна низкая производительность и трудоемкость обработки наплавленных режущих кромок, требующих снятие припуска как по цилиндрической поверхности, так и по двум торцам. В процессе наплавки припуск на обработку может составлять несколько миллиметров. Шлифование рабочей части ножа оказывается весьма затратным.

Следует отметить возможность использования технологии наплавки для изготовления и восстановления изношенных кромок дисконных ножей [3]. В процессе наплавки термическое воздействие на основной металл обеспечивает условия для изменения структуры и свойств зоны термического влияния. Управлять термическим циклом наплавки возможно за счет применения устройства для отвода тепла [4, 5]. Такой технологический прием обеспечивает возможность управлением структурой не только наплавленного металла, но и металла зоны термического влияния.

Авторы [6] исследовали влияние размеров переходной зоны на предел выносливости восстановленных деталей и привели рекомендации, повышающие эксплуатационные характеристики изделий, наплавленных проволокой марок У7, 08Х13, ПП-Нп80Х20Р3Т [6]. В ряде работ рассматриваются процессы изменения микроструктуры основного и наплавленного металла [7, 8]. Моделированию распределения температуры при наплавке с использованием программного пакета Mathcad посвящена работа Гордеева И.Е. [9].

Выбору инструментального материала для изготовления режущей кромки дисконного ножа необходимо уделить особое внимание. В опубликованных работах авторы уделяют внимание быстрорежущим сталям [10, 11]. В работе Гадалова В.Н. показана возможность повышения износостойкости покрытий из порошковой стали Р6М5 после электронно-лучевой наплавки термоциклированием [12]. Возможность повышения обрабатываемости быстрорежущих сталей после

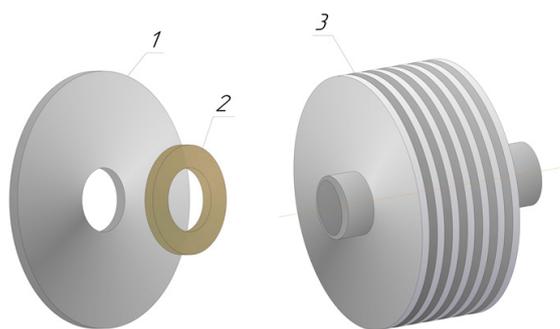


Рис. 3. Сборка пакета заготовок дисковых ножей: 1 – заготовка дискового ножа; 2 – разделительная шайба; 3 – пакет заготовок дисковых ножей

Fig. 3. Assembly of a package of disc knife blanks: 1 – disk knife blank; 2 – spacer; 3 – package of blanks for disc knives

модифицирования поверхности описана в работе Мартынова В.В. [13]. Наплавка быстрорежущих сталей сопряжена с риском образования трещин. В работе приведены результаты исследований влияния технологических факторов на процесс возникновения трещин в наплавленном металле [14]. Чаус А.В. описал процессы образования структуры оплавленной поверхности быстрорежущей стали в состоянии отжига при лазерном воздействии [15]. Перспективы лазерной обработки быстрорежущих сталей будут рассмотрены более подробно.

На основе анализа опубликованных работ можно сделать вывод о том, что управление термическим циклом наплавки в процессе изготовления дискового ножа можно считать наиболее эффективным методом для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик металла режущей кромки, выполненной из быстрорежущей стали.

Оптимальным следует считать способ изготовления дискового ножа, при котором выполняют наплавку режущих кромок заготовки из конструкционной стали 30ХГСА. Наплавку осуществляют теплостойкой сталью Р2М8. Затем проводят термическую обработку заготовки и чистовую механическую обработку.

Рассмотрим более подробно технологический процесс изготовления дискового ножа по разработанной технологии.

Заготовки для дискового ножа из стали 30ХГСА возможно получить штамповкой или лазерной резкой из листового проката. При диаметре ножа до 100 мм при единичном или мелкосерийном производстве возможно заготовку получать точением из круглого проката. Необходимо изготовить посадочное отверстие дискового ножа с приемлемой точностью. Перед сборкой целесообразно выполнить очистку поверхности под наплавку абразивным методом.

Заготовки дисковых ножей перед наплавкой собирают в пакет. Пакетная наплавка позволяет существенно повысить производительность. Между заготовками устанавливают разделительные шайбы толщиной от 0,5 до 1,5 мм. Установка заготовок дисковых ножей в пакет (рис. 3) позволяет сократить время изготовления, повысить эффективность загрузки оборудования и производительность операции наплавки, термической обработки и предварительного шлифования.

Размещение шайбы для формирования зазора величиной от 0,5 до 1,5 мм между заготовками необходима для облегчения последующего разделения заготовок дисковых ножей. При уменьшении зазора менее 0,5 мм выполнить разделение заготовок с помощью лазерно-кислородной резки оказывается затруднительным. В этом случае на боковой поверхности ножа будут присутствовать оплавления поверхностного слоя металла, а также возникают налипания удаляемого металла. Увеличение зазора более 1,5 мм не целесообразно. Будет наблюдаться перерасход дорогостоящего инструментального материала, а также повышается трудоемкость изготовления за счет большего значения припуска на последующее шлифование по боковой поверхности.

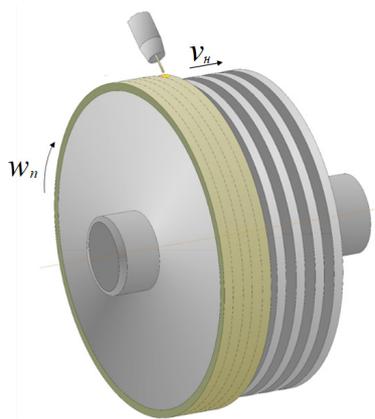


Рис. 4. Наплавка пакета заготовок дисковых ножей  
 Fig. 4. Surfacing of a package of disc knife blanks

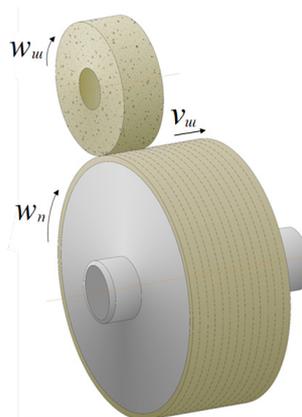


Рис. 5. Предварительное шлифование пакета заготовок дисковых ножей  
 Fig. 5. Pre-grinding of a package of disc knife blanks

Затем проводят наплавку по цилиндрической поверхности пакета заготовок дисковых ножей, толщина наплавленного слоя от 2 до 4 мм. Для увеличения толщины наплавленного слоя по боковой поверхности ножа возможно выполнить разделку кромок в плоскости перпендикулярной оси заготовки. Уменьшение высоты наплавленного валика менее 2 мм не позволяет получить необходимую прочность и твердость рабочей части дискового ножа, увеличение высоты валика более 4 мм приводит к увеличению расхода инструментальной стали. Целесообразно применить электродугую наплавку порошковой проволокой в среде инертного газа (аргон). Термическая обработка изделия заключается в проведении трехкратного отпуска при температуре 525 – 550°C. Продолжительность каждого цикла отпуска 45 – 60 минут. Такие параметры термической обработки позволяют в полной мере обеспечить превращение остаточного аустенита в мартенсит отпуска в быстрорежущей стали. Кроме того, устраняются остаточные внутренние напряжения в металле, в результате обеспечивается необходимая твердость и прочность режущей части инструмента. Свойства основного металла (сталь 30ХГСА) остаются при этом на приемлемом уровне.

Предварительная шлифовка пакета заготовок по наружной цилиндрической поверхности (рис. 5) обеспечивает повышение производительности и сокращает общее время обработки за счет уменьшения времени на снятие и установку изделия на шлифовальном станке.

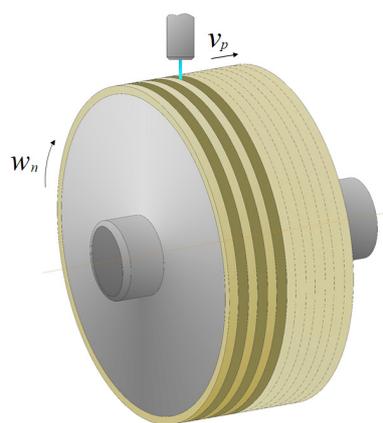


Рис. 6. Лазерная резка пакета заготовок дисковых ножей

Fig. 6. Laser cutting of a package of disc knife blanks

Разделение пакета заготовок осуществляется лазерной резкой (рис. 6), которая обеспечивает высокое качество поверхности заготовки после разделения.

Воздействие лазерного излучения на металл обеспечивает возможность получения закаленной структуры с высоким комплексом эксплуатационных свойств. В работе [16] показана возможность упрочнения штампового инструмента из стали Р6М5 лазерами непрерывного действия. В статье [17] обоснован метод восстановления и упрочнения штампов из сложнoleгированных сталей 5Х2МНФ, 4Х5МФС при помощи твердотельного лазера. Проведен экономический анализ, и описан экономический эффект от применения комплекса [17]. Лисовский А.Л. и Плетенев И.В. в своих работах доказали эффективность лазерного упрочнения для штамповой оснастки. Если некоторая поверхность последовательно закаливается соприкасающимися или перекрывающимися зонами, необходимо учитывать отличие их свойств от свойств зон закалки [18].

Газолазерная резка инструментальных сталей сопровождается процессами упрочнения металла. В работах Барабановой И.А. приведены результаты исследований быстрорежущей стали Р2М8 после газолазерной резки и лазерного отпуска. Автор использовала оптический и растровый электронный микроскоп [19, 20]. Лазерное воздействие обеспечивает увеличение микротвердости на 200...600 МПа в зонах закалки из жидкой фазы. Такой результат можно объяснить процессами дисперсионного твердения металла. После газолазерной резки и лазерного отпуска быстрорежущая сталь приобретает высокую микротвердость и оптимальный фазовый состав поверхностного слоя: мартенсит, дисперсные карбиды и до 5...7% остаточного аустенита [19, 20].

Окончательное шлифование дискового ножа по боковой поверхности проводят для формирования рабочей формы режущих кромок (рис. 7).

### Практическая реализация

Сущность предлагаемого способа можно описать на примере изготовления дискового ножа для резки абразивной ленты.

Заготовки в форме диска с внутренним отверстием получают из листа стали 30ХГСА размером  $1,2 \times 1000 \times 2000$  мм. Полученные заготовки собирают в пакет, устанавливая на вал диаметром 32 мм, и фиксируют на оправке при помощи гайки или клина, при этом между заготовками устанавливают разделительные шайбы толщиной 1 мм из конструкционной стали 08.

Далее осуществляют наплавку по наружной цилиндрической поверхности пакета заготовок порошковой проволокой Р2М8. Режим наплавки  $I = 200$  А,  $U = 20$  В,  $V_h = 15$  м/час. Толщина наплавленного слоя около 3 мм, в качестве защитного газа используется аргон.

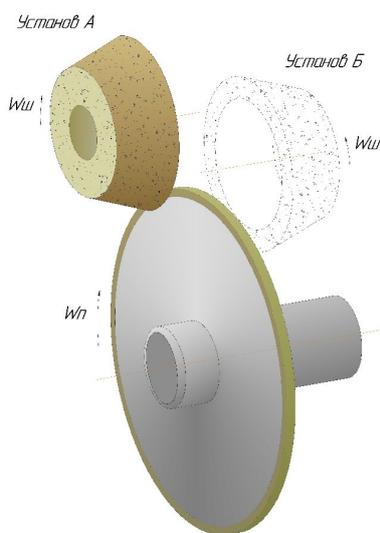


Рис. 7. Шлифование торцевой поверхности дискового ножа

Fig. 7. Grinding of the end surface of a disc knife

После наплавки проводят термическую обработку. Твердость стали после термообработки составляет 62...65 HRC.

Затем пакет наплавленных заготовок шлифуют по цилиндрической поверхности на кругло-шлифовальном станке.

Заготовки дискового ножа разделяют с помощью лазерной резки. Рекомендуемые режимы:  $P = 2000$  Вт,  $f = 1500$  Гц,  $V_p = 1$  м/мин. Для обеспечения разделения заготовок по окружности необходимо применять специальный вращатель с центром в задней бабке.

После разделения заготовок проводится заточка рабочей поверхности до придания окончательной геометрической формы режущей кромке.

### Выводы

Разработанная технология позволяет уменьшить время изготовления дискового ножа за счет использования пакета заготовок и возможности производства пакета дисковых ножей с выполнением наплавки режущих частей и шлифовки цилиндрической поверхности за один цикл производимых операций.

Термический цикл, состоящий из плавления порошковой проволоки, охлаждения и кристаллизации с получением наплавленного металла в закаленном состоянии из жидкой фазы, трехкратного нагрева до 525 – 550 °С, обеспечивающего отпуск стали и лазерного нагрева при резке, обеспечивает получение металла режущей кромки из быстрорежущей стали с высокой твердостью и износостойкостью.

На основе проведенной работы была составлена заявка и получен патент на изобретение «Способ изготовления дискового ножа» № 2752719 зарегистрированный в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 30 июля 2021 года [21].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Фейман И.И.** Дисковый нож для резки листовых материалов Пат. 2627528 Российская Федерация, МПК В26D 1/14. Заявитель и патентообладатель И.И. Фейман. – № 2016101380, заявл. 18.01.2016, опубл. 21.07.2017, Бюл. № 21.

- [2] **Неверов В.В., Клевцов П.Н., Лебедев С.В., Неверов В.С.** Восстановление дисковых ножей наплавкой сплавами повышенной прочности // Вестник ЛГТУ. 2019. Т. 41. №. 3. С. 33.
- [3] **Карих В.В., Неверов В.В.** Дисковый нож. Пат. 2297902 Российская Федерация, МПК В23D 35/00. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ)». – №2005128041/02, заявл. 07.09.2005, опубл. 27.04.2007, Бюл. № 22.
- [4] **Архипов П.Н., Кусков В.Н.** Устройство для отвода тепла из зоны наплавки изделия. Патент на полезную модель RU 57658 U1 / Заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный нефтегазовый университет» Заявл. 10.05.2006, опубл. 27.10.2006.
- [6] **Иванов В.П., Вигерина Т.В.** Повышение качества восстановления деталей с нанесением покрытий // Горная механика. 2009. № 4. С. 80–87.
- [7] **Лаврентьев А.Ю., Дожделев А.М.** Совершенствование структуры зоны термического влияния наплавленного биметаллического инструмента // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23, № 3. С. 118–126.
- [8] **Михальченков А.М., Феськов С.А., Козарез И.В., Слезко Е.И.** Изменение микроструктуры и микротвердости стали 65Г после термоупрочнения и наплавки малоуглеродистым электродом // Технический сервис машин. 2021. № 1 (142). С. 107–114.
- [9] **Гордеев И.Е.** Математическое моделирование зоны термического влияния процесса наплавки // "ЧИСТАЯ НАУКА" на службе научно-технического прогресса: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Тюмень, 23 октября 2018 года. – Тюмень: Общество с ограниченной ответственностью "Агентство международных исследований", 2018. С. 6–9.
- [10] **Shunduo Wang.** Influence of Co on the microstructure and mechanical properties of M42 high-speed steel [Текст] / Shunduo Wang, Yunbo Chen, Peng Pan, Zhenghua Lin, Lingli Zuo // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. –№ 2393. –С. 1–7.
- [11] **Yu Liu.** Study on Friction and Wear Behaviors of M42 High Speed Steel [Текст] / Yu Liu, Dong Li, Qingli Shao, Haikun Ma, Jie Kang, Ru Su // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. –№ 2168. – С. 41–50.
- [12] **Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Кутепов С.Н. [и др.]** Изучение и анализ с оценкой износа покрытия из порошковой стали Р6М5, полученного электронно-лучевой наплавкой в вакууме с применением термоциклирования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 5. – С. 362–368. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-362-363
- [13] **Мартынов В.В., Таранова А.В., Евсеев А.В.** Оценка возможностей улучшения обрабатываемости изделий инструментом из быстрорежущей стали с модифицированной рабочей частью [Текст] // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 5 (107). – С. 19–22.
- [14] **Барчуков Д.А., Вавилов Р.В., Якимюк Р.И.** Исследование факторов, влияющих на образование трещин в наплавленных быстрорежущих сталях [Текст] // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2020. – № 2 (6). – С. 21–27.
- [15] **Чаус А.В., Максименко А.В., Федосенко Н.Н. [и др.]** Формирование структуры при лазерном оплавлении поверхности отожженной быстрорежущей стали [Текст] // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120, № 4. – С. 400–407.
- [16] **Тескер Е.И., Митин В.Я., Карпова А.П., Бондаренко Ю.В.** Упрочнение вырубного инструмента из стали Р6М5 лазерами непрерывного действия // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1989. – № 10. – С. 18–20.
- [17] **Гавариев Р.В., Савин И.А., Гавариева К.Н., Савина А.И.** Лазерное упрочнение штампов в условиях крупного машиностроительного предприятия // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2021. – Т. 77, № 2. – С. 26–30.

[18] **Лисовский А.Л., Плетнев И.В.** Разработка технологии лазерного упрочнения штамповой оснастки // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Промышленность. – 2008. – № 2. – С. 65–72.

[19] **Varabonova I.A., Romanenko E.F., Volodin I.M. [and etc.]** Study of structure and properties of high-speed steels treated by gas & laser beam cutting and laser weld tempering // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. Issue 4. – Pp. 659–666.

[20] **Барабонова И.А., Романенко Е.Ф., Шкатов В.В. [и др.]** Исследование структуры и свойств быстрорежущих сталей после газолазерной резки и лазерного отпуска // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. 2016. № 3. С. 21–32.

[21] **Какорин Д.Д., Лаврентьев А.Ю.** Способ изготовления дискового ножа. Пат. 2752719 Российская Федерация, МПК В23Р 15/40. Заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет (ТвГТУ)». – №2020142298, заявл. 21.12.2020, опубл. 30.07.2021, Бюл. № 22.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЛАВРЕНТЬЕВ Алексей Юрьевич** – доцент, *Тверской государственный технический университет, канд. техн. наук.*

E-mail: lavr\_ay@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6884-8980>

**КАКОРИН Даниил Дмитриевич** – аспирант, *Тверской государственный технический университет, без степени.*

E-mail: kakorin0000@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3356-5414>

**БАРЧУКОВ Дмитрий Анатольевич** – заведующий кафедрой *технологии металлов и материаловедения, Тверской государственный технический университет, канд. техн. наук.*

E-mail: bda@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7428-776X>

### REFERENCES

[1] **I.I. Feyman**, Diskovyy nozh dlya rezki listovykh materialov Pat. 2627528 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B26D 1/14. Zayavitel i patentoobladatel I. I. Feyman. – № 2016101380, заявл. 18.01.2016, опубл. 21.07.2017, Бюл. № 21.

[2] **V.V. Neverov, P.N. Klevtsov, S.V. Lebedev, V.S. Neverov**, Vosstanovleniye diskovykh nozhey naplavkoy splavami povyshennoy prochnosti // Vestnik LGTU. 2019. T. 41. №. 3. S. 33.

[3] **V.V. Karikh, V.V. Neverov**, Diskovyy nozh. Pat. 2297902 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B23D 35/00. Zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye byudzhethnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Lipetskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet (LGTU)». – №2005128041/02, заявл. 07.09.2005, опубл. 27.04.2007, Бюл. № 22.

[4] **P.N. Arkhipov, V.N. Kuskov**, Ustroystvo dlya otvoda tepla iz zony naplavki izdeliya. Patent na poleznuyu model RU 57658 U1 / Zayavitel i patentoobladatel Gosudarstvennoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego professionalnogo obrazovaniya «Tyumenskiy gosudarstvennyy neftegazovyy universitet» Zayavl. 10.05.2006, опубл. 27.10.2006.

- [5] **A.M. Dozhdelev, A.Yu. Lavrentyev, I.A. Barabonova**, Sposob otvoda tepla v protsesse naplavki s ispolzovaniyem zhidkostnogo okhlazhdeni // Vestnik sovremennykh issledovaniy. 2018. № 9.3 (24). S. 247–252.
- [6] **V.P. Ivanov, T.V. Vigerina**, Povysheniye kachestva vosstanovleniya detaley s nanoseniyem pokrytiy // Gornaya mekhanika. 2009. № 4. S. 80–87.
- [7] **A.Yu. Lavrentyev, A.M. Dozhdelev**, Sovershenstvovaniye struktury zony termicheskogo vliyaniya naplavlennogo bimetallicheskogo instrumenta // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2017. T. 23, № 3. S. 118–126.
- [8] **A.M. Mikhailchenkov, S.A. Feskov, I.V. Kozarez, Ye.I. Slezko**, Izmeneniye mikrostruktury i mikroverdsti stali 65G posle termouprochneniya i naplavki malouglerodistym elektrodom // Tekhnicheskij servis mashin. 2021. № 1 (142). S. 107–114.
- [9] **I.Ye. Gordeyev**, Matematicheskoye modelirovaniye zony termicheskogo vliyaniya protsessa naplavki // "ChISTAYa NAUKA" na sluzhbe nauchno-tehnicheskogo progressa: sbornik statey po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen, 23 oktyabrya 2018 goda. – Tyumen: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennostyu "Agentstvo mezhdunarodnykh issledovaniy", 2018. S. 6–9.
- [10] **Shunduo Wang**, Influence of Co on the microstructure and mechanical properties of M42 high-speed steel [Tekst] / Shunduo Wang, Yunbo Chen, Peng Pan, Zhenghua Lin, Lingli Zuo // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – №2393. – S. 1–7.
- [11] **Yu Liu**, Study on Friction and Wear Behaviors of M42 High Speed Steel [Tekst] / Yu Liu, Dong Li, Qingli Shao, Haikun Ma, Jie Kang, Ru Su // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 2168. – S. 41–50.
- [12] **V.N. Gadalov, V.R. Petrenko, S.N. Kutepov, [i dr.]** Izucheniye i analiz s otsenkoy iznosa pokrytiya iz poroshkovoy stali R6M5, poluchennogo elektronno-luchevoy naplavkoy v vakuume s primeneniyem termot-siklirovaniya // Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. – 2023. – № 5. – S. 362–368. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-5-362-363
- [13] **V.V. Martynov, A.V. Taranova, A.V. Yevseyev**, Otsenka vozmozhnostey uluchsheniya obrabatyvayemosti izdeliy instrumentom iz bystrorezhushchey stali s modifitsirovannoy rabochey chastyu [Tekst] // Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii. – 2020. – № 5 (107). – S. 19–22.
- [14] **D.A. Barchukov, R.V. Vavilov, R.I. Yakimyyuk**, Issledovaniye faktorov, vliyayushchikh na obrazovaniye treshchin v naplavlennykh bystrorezhushchikh stalyakh [Tekst] // Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskiye nauki. – 2020. – № 2(6). – S. 21–27.
- [15] **A.V. Chaus, A.V. Maksimenko, N.N. Fedosenko, [i dr.]** Formirovaniye struktury pri lazernom oplavlenii poverkhnosti otozhzhennoy bystrorezhushchey stali [Tekst] // Fizika metallov i metallovedeniye. – 2019. – T. 120, № 4. – S. 400–407.
- [16] **Ye.I. Tesker, V.Ya. Mitin, A.P. Karpova, Yu.V. Bondarenko**, Uprochneniye vyrubnogo instrumenta iz stali R6M5 lazerami nepreryvnogo deystviya // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. – 1989. – № 10. – S. 18–20.
- [17] **R.V. Gavariyev, I.A. Savin, K.N. Gavariyeva, A.I. Savina**, Lazernoye uprochneniye shtampov v usloviyakh krupnogo mashinostroitelnogo predpriyatiya // Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva. – 2021. – T. 77, № 2. – S. 26–30.
- [18] **A.L. Lisovskiy, I.V. Pletenev**, Razrabotka tekhnologii lazernogo uprochneniya shtampovoy osnastki // Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnyye nauki. Promyshlennost. – 2008. – № 2. – S. 65–72.
- [19] **I.A. Barabonova, E.F. Romanenko, I.M. Volodin, [and etc.]** Study of structure and properties of high-speed steels treated by gas & laser beam cutting and laser weld tempering // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2017. Vol. 52. Issue 4. – Pp. 659–666.
- [20] **I.A. Barabonova, Ye.F. Romanenko, V.V. Shkatov, [i dr.]** Issledovaniye struktury i svoystv bystrorezhushchikh staley posle gazolazernoy rezki i lazernogo otpuska // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i tekhnologii. 2016. № 3. – S. 21–32.

[21] **D.D. Kakorin, A.Yu. Lavrentyev**, Sposob izgotovleniya diskovogo nozha. Pat. 2752719 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B23P 15/40. Zayavitel i patentoobladatel Federalnoye gosudarstvennoye byudzhethnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya «Tverskoy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet (TvGTU)». – №2020142298, zayavl. 21.12.2020, opubl. 30.07.2021, Byul. №22.

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Aleksey Yu. LAVRENT'EV** – *Tver State Technical University.*

E-mail: lavr\_ay@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6884-8980>

**Daniil D. KAKORIN** – *Tver State Technical University.*

E-mail: kakorin0000@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3356-5414>

**Dmitry A. BARCHUKOV** – *Tver State Technical University.*

E-mail: bda@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7428-776X>

Поступила: 20.06.2023; Одобрена: 31.08.2023; Принята: 12.09.2023.

Submitted: 20.06.2023; Approved: 31.08.2023; Accepted: 12.09.2023.

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29308>



М.В. Троцкий<sup>1</sup> ✉, А.А. Попович<sup>1</sup>,  
В.В. Каминский<sup>2</sup>, С.Ю. Петрович<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

✉ [m\\_trotsky.ru@mail.ru](mailto:m_trotsky.ru@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ НИТРОБОРИДОВ ТИТАНА (Ti3B2N) МЕТОДАМИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА И ИПС

*Аннотация.* Данная работа посвящена синтезу нитроборидов титана методом механохимического синтеза с последующим искровым плазменным спеканием (SPS) и плазменной сфероидизацией. Полученные материалы не отвечали требованиям грансостава для дальнейшего плазменного напыления и применения в качестве износостойких напыляемых покрытий. Для консолидации частиц была произведена спрейная сушка материала. Отсутствие стехиометрического состава Ti3B2N после 20 часов механической обработки смеси TiN – TiB2 свидетельствует о том, недостаточности либо времени, либо энергонасыщенности процесса для синтеза. Однако, если в качестве исходных компонентов использовать не вышеуказанные бинарные соединения, а металлический титан (Ti), нитрид бора (BN) и диборид титана (TiB2) – время обработки можно уменьшить до 5 часов, по истечении которых уже образуется соединение, близкое по стехиометрии к искомому. Диапазон значений твёрдости у полученных соединений после SPS составляет от 16800 до 22560 МПа, а в среднем – 19570 МПа.

*Ключевые слова:* механосинтез, износостойкие покрытия, коррозионностойкие покрытия, керамические материалы, нитроборид титана, SPS, плазменная сфероидизация, спрейная сушка.

*Благодарности:* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90103.

*Для цитирования:*

Троцкий М.В., Попович А.А., Каминский В.В., Петрович С.Ю. Разработка технологических основ получения многокомпонентных соединений на основе нитроборидов титана (Ti3B2N) методами механохимического синтеза и ИПС // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 111–123. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29308>



M.V. Trotsky<sup>1</sup> ✉, A.A. Popovich<sup>1</sup>,  
V.V. Kaminskii<sup>2</sup>, S.Yu. Petrovich<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> ITMO University, St. Petersburg, Russia

✉ m\_trotsky.ru@mail.ru

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL FUNDAMENTALS FOR PRODUCTION OF MULTICOMPONENT COMPOUNDS BASED ON TITANIUM NITROBORIDES (Ti<sub>3</sub>B<sub>2</sub>N) BY MECHANOCHEMICAL SYNTHESIS AND SPS

*Abstract.* This work is devoted to the synthesis of titanium nitroborides by mechanochemical synthesis followed by spark plasma sintering (SPS) and plasma spheroidization. The obtained materials did not meet the requirements of the grain size composition for further plasma spraying and use as wear-resistant sprayed coatings. To consolidate the particles, spray drying of the material was carried out. The absence of the stoichiometric composition of Ti<sub>3</sub>B<sub>2</sub>N after 20 hours of mechanical treatment of the TiN – TiB<sub>2</sub> mixture indicates that either the time or the energy saturation of the process for synthesis is insufficient. However, if we use metallic titanium (Ti), boron nitride (BN) and titanium diboride (TiB<sub>2</sub>) instead of the above binary compounds as initial components, the processing time can be reduced to 5 hours: this period already produces a compound with the stoichiometry close to the required one. The range of hardness values for the obtained compounds after SPS is from 16800 to 22560 MPa, 19570 MPa on average.

*Keywords:* mechanosynthesis, wear-resistant coatings, corrosion-resistant coatings, ceramic materials, titanium nitroboride, SPS, plasma spheroidization, spray drying.

*Acknowledgements:* The study was carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-33-90103.

*Citation:*

M.V. Trotsky, A.A. Popovich, V.V. Kaminskii, S.Yu. Petrovich, Development of technological fundamentals for production of multicomponent compounds based on titanium nitroborides (Ti<sub>3</sub>B<sub>2</sub>N) by mechanochemical synthesis and SPS, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 111–123, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29308>

**Введение.** В последние годы наблюдается повышенный интерес к технологиям производства керамических материалов на основе титана, обладающих свойствами, уровень которых по соотношению «цена-качество» превосходит уровень аналогичных материалов на основе других металлов. Прочность соединения с металлом у современных титановых керамических изделий соответствует уровню металлокерамических систем на основе благородных металлов или сплавов из них.

Керамические соединения системы Ti-B-N обладают высокой твердостью, что обусловлено их кристаллической структурой. Например, титан-нитрид (TiN) обладает твердостью 22–24 ГПа, борид титана (TiB<sub>2</sub>) – 25–30 ГПа, а борид-нитрид титана (TiBN) – 28–35 ГПа [1]. В работе [2] была измерена твердость TiB<sub>2</sub>N методом микроиндентирования. Было показано, что твердость TiB<sub>2</sub>N составляет около 31 ГПа. В работе [3] была измерена твердость TiBN методом наноиндентирования. Было показано, что твердость TiBN составляет около 27 ГПа. В другой работе [4] было показано, что твердость Ti<sub>2</sub>BN и Ti<sub>3</sub>BN составляет соответственно 22,6 ГПа и 21,2 ГПа. Также

эти соединения обладают высокой прочностью, что делает их перспективными материалами для изготовления режущих инструментов, абразивных материалов и других приложений, требующих высокой износостойкости.

Керамические соединения системы Ti-B-N обладают высокой термостойкостью, что делает их перспективными для применения в условиях высоких температур. Например, титан-нитрид (TiN) и борид-нитрид титана (TiBN) могут выдерживать температуры до 1200 °С, а борид титана (TiB<sub>2</sub>) – до 1700 °С [5]. Это делает эти соединения полезными для изготовления компонентов турбин, газовых турбин, высокотемпературных печей и других приложений, где требуется стойкость к высоким температурам [6].

Керамические соединения системы Ti-B-N также обладают высокой стойкостью к химической коррозии. Например, титан-нитрид (TiN) и борид-нитрид титана (TiBN) обладают высокой стойкостью к окислению и коррозии в агрессивных средах, таких как кислоты и щелочи. Это делает эти соединения полезными для применения в условиях химической атаки [7].

В настоящее время диборид титана (TiB<sub>2</sub>) занял прочное место в промышленности благодаря своим уникальным механическим и физическим характеристикам – повышенной температуре плавления (3225 °С), низкому ТКЛР ( $4,6 \times 10^{-6}$  К), высокой твердости, повышенному значению модуля упругости (более 500 ГПа), высокой стойкости к окислению, химической стабильности и высокой электропроводности. Спекание этого вещества затруднено, особенно в нелегированных видах, за счет прочной ковалентной связи, наличия оксидных слоев на его частицах и очень низкого коэффициента самодиффузии [8]. С одной стороны, достижение полностью плотного монокристаллического TiB<sub>2</sub> требует высоких внешних давления и температуры спекания (> 2500 °С) [9], с другой стороны, выполнение таких условий спекания может привести к чрезмерному росту зерна и как следствие этого – к низким механическим свойствам компакта [10]. В последние годы многие исследователи пытались преодолеть вышеупомянутые ограничения следующими способами: 1) оптимизация методов обработки; 2) введение различных добавок для спекания керамических материалов, включая нитриды (BN, AlN и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), карбиды (TaC, B<sub>4</sub>C, WC, TiC, NbC и SiC), силициды (MoSi<sub>2</sub>), оксиды (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), бориды (ZrB<sub>2</sub>) [11]. Также для получения тонкой микроструктуры может быть полезным искровое плазменное спекание (SPS) [12] благодаря относительно низкой температуре процесса по сравнению с альтернативными технологиями – горячим прессованием, спеканием без давления и т. д. – и короткому времени выдержки совместно с высоким давлением при спекании.

В работе [13] были изучены влияние размера частиц и условий спекания в ходе проведения SPS на свойства спекённых композитов на основе TiB<sub>2</sub>. При компактировании по режиму: температура – 1800 °С, давление 30 МПа, время выдержки – 15 мин образца, армированного частицами SiC 200 нм, была достигнута плотность компакта 99,5%. Аналогичная работа проводилась по изучению влияния температуры SPS и времени выдержки на уплотнение TiB<sub>2</sub> – SiC [14]. Этим исследованием были определены оптимальные условия SPS, которые обеспечивают относительную плотность выше 99% – температура спекания 1900 °С и время выдержки 10 минут.

Также были выполнены некоторые ценные исследования о влиянии некоторых нитридных добавок на развитие микроструктуры и уплотнение керамики TiB<sub>2</sub> – SiC. В работе [15] к композиту TiB<sub>2</sub> – 20 об. % SiC, спеченному при 1900 °С с помощью SPS добавили 5 мас. % TiN, что позволило получить почти полностью плотный компакт.

В исследовании [16] оценивалось влияние добавки BN на консолидацию и микроструктурные аспекты композиционного материала TiB<sub>2</sub> – SiC. Для этого методом искрового плазменного спекания при 1900 °С были изготовлены два образца на основе TiB<sub>2</sub>-20 об. % SiC – с 5 мас. % BN и без него. Внешнее давление и время выдержки в обоих случаях составили 40 МПа и 7 минут соответственно. Введение BN в матрицу TiB<sub>2</sub> привело к получению более тонкой микроструктуры, чем у спеченного монокристаллического TiB<sub>2</sub> – SiC без BN.

Обычно пленки Ti-B-N получают химическим осаждением из паровой фазы (CVI), плазменным CVD, дуговым физическим осаждением из паровой фазы (PVD) и магнетронным распылением. Однако все перечисленные способы подвержены следующим существенным недостаткам: высокая стоимость необходимого для реализации процесса оборудования, сложность получения больших объемов вследствие долгого процесса наслаивания.

**Целью работы** является разработка технологических основ получения многокомпонентных соединений на основе нитроборида титана ( $Ti_3B_2N$ ) методами механохимического синтеза и СВС, пригодных для последующего применения в качестве напыляемых покрытий.

### **Материалы и методы**

#### **Методы**

##### *Механохимический синтез*

Механохимический синтез проводилось на атриторе марки Union Process SD-5 (США). Он предназначен для измельчения, механического легирования и реакционного размола порошковых смесей с целью формирования ультрадисперсной однородной структуры материала.

Аппарат состоит из размольной емкости, заполненной мелющими телами, и вращающегося вала (ворошителя), размещенного по оси размольной емкости, снабженного радиально расположенными стержнями, погруженными в шаровую загрузку. При вращении ворошителя радиальные стержни вовлекают в движение мелющие тела. Движение мелющих тел в атриторе происходит по довольно сложным траекториям. Шары в атриторе двигаются не только в горизонтальной плоскости, также в объеме размольной камеры наблюдается интенсивное вертикальное перемещение («конвективные» потоки), способствующие перемешиванию обрабатываемого материала. В ходе обработки частицы материала испытывают ударное и истирающее (сдвиговое) воздействие. Движение мелющих тел в атриторе можно сравнить с перемешиванием вязкой жидкости в резервуаре.

Механохимический синтез порошковых смесей системы  $TiB_2 - TiN$  производили в атриторе при частоте вращения импеллера 272 об/мин. Загрузка размольных тел – 30 кг. Масса шихты – 1 кг. Химический состав исходных шихт представлен в табл. 2. Через каждые 2000 секунд атритор останавливали для охлаждения реакционной смеси и отбора проб. Общее время обработки материала составило 20 часов.

##### *Плазменная сфероидизация*

Экспериментальные исследования плазменной сфероидизации порошков проводились на установке Тек-15 производства Tekna Plasma Systems Inc. (Канада). Установка плазменной сфероидизации TekSphero 15 оснащена высокочастотным генератором максимальной мощностью 15 кВт. Рабочая частота находится в диапазоне от 2 до 4 МГц.

В общем виде процесс сфероидизации материалов можно представить состоящим из трех стадий: нагрев и плавление порошка, пролет каплей по траектории → от → плазмотрона → в → реактор, и наконец, кристаллизация → и → охлаждение. При этом воздействие плазмы может приводить к перегреву и испарению частиц порошка с последующей конденсацией в виде субмикронных частиц. Тепловая мощность, отбираемая от плазмы при вводе в нее частиц порошка, является наиболее важной характеристик процесса. Именно эта величина лежит в основе анализа эффективности, совершенствования и оптимизации режимов обработки порошков в высокочастотных плазменных установках. Технологические параметры плазменной сфероидизации нитроборидов титана представлена в табл. 1.

##### *Искровое плазменное спекание*

В работе использовалась установка искрового-плазменного спекания HPD 25 FCT Systeme GmbH. В процессе спекания образец разогревается прямым пропусканием коротких импульсов постоянного тока при наружном механическом давлении, в результате чего время цикла нагрева

сокращается до нескольких минут. Агломерационная активность материалов возрастает за счет процессов, протекающих в точках соприкосновения частиц порошка, и при этом не происходит роста размера зерна. Процесс спекания проводят в вакууме, аргоне, азоте или гелии, что позволяет избежать окисления.

Искровое плазменное спекание (SPS) проводили в следующем режиме: прессование с давлением 44,2 МПа без нагрева; нагрев прессовки до 1800 °С при одновременном нагружении давлением 132,6 МПа; выдержка прессовки 5 минут.

Таблица 1  
Технологические параметры плазменной сфероидизации  $Ti_3B_2N$

Table 1

Technological parameters of  $Ti_3B_2N$  plasma spheroidization

Химический состав порошка, г/мин	Мощность установки, кВт	Давление в реакторе, атм	Плазмаобразующий газ, л/мин	Расход плазмаобразующего газа, л/мин	Расход центрального газа, л/мин	Расход несущего газа, л/мин	Скорость подачи порошка,
$Ti_3B_2N$	15	1	Ar + He	30(Ar) + 5(He)	15	2	8

*Спрейная сушка*

Высокоскоростная центробежная распылительная сушилка серии LPG- 5 представляет собой специальное оборудование, подходящее для сушки эмульсионных и суспензированных жидкостей. При распылении материала со связующим происходит уменьшение удельной площади поверхности. В процессе распыления происходит испарение около 65–98 % жидкости. Время высыхания 5–10 секунд.

Спрейную сушку порошка  $Ti_3B_2N$  проводил при температуре 95 °С в течение 30 минут, скорость подачи порошка 42,5 г / мин. Частота распылителя 200 Гц. Частота вентилятора 50 Гц. Концентрация связующего поливинилового спирта (ПВС) в воде – 2%. Соотношение связующего с порошком: 650 мл ПВС / 1280 г  $Ti_3B_2N$  + 650 мл изопропилового спирта.

**Материалы**

Две шихты, химический состав которых приведён в табл. 2, были подвергнуты механохимическому синтезу, плазменной сфероидизации и искровому плазменному спеканию.

Таблица 2  
Химический состав исходных шихт

Table 2

Chemical composition of initial mixtures

Шихта	Содержание, мас. %			
	TiN (99,9%)	$TiB_2$ (99,9%)	BN (99%)	Ti (99,8%)
№ 1	25	75	–	–
№ 2	–	47,8	22,4	29,8

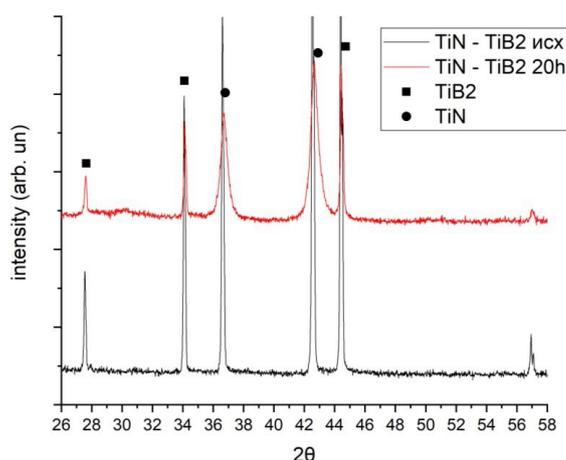


Рис. 1. Дифрактограммы TiN-TiB<sub>2</sub> (шихта №1) до и после механохимической обработки в течение 20 ч  
 Fig. 1. X-ray diffraction patterns of TiN-TiB<sub>2</sub> (mix. No. 1) before and after mechanochemical processing for 20 hours

### Экспериментальная часть

После проведения полного механосинтеза в течение 20 ч был проведен РФА полученного продукта и сравнение его с РФА исходной смеси (рис. 1).

Дифрактограмма исходной смеси представляет собой строго сформированные пики, присущие кристаллическим веществам. Можно отметить, что они имеют высокое значение интенсивности и острую форму самого пика, что свидетельствует о бездефектной кристаллической структуре.

Дифрактограмма продукта 20 часов обработки демонстрирует незначительное уширение пиков из-за увеличения дефектности кристаллической решетки вследствие высокоэнергетической обработки, при этом интенсивность всех пиков снизилась, а их полуширина увеличилась. Незначительное уширение пиков свидетельствует о недостаточности приложенной энергии во время механической обработки. Практически не наблюдается растворение исходных элементов, синтез если и протекает, то очень медленно.

Значения микротвердости фрагментов прессовки SPS представлено в табл. 3.

Таблица 3

#### Значения микротвердости фрагментов прессовки SPS продукта обработки шихты № 1

Table 3

#### Microhardness of the SPS product compact fragments mixture No. 1 after treatment

№ фрагмента	1	2	3	4	5	6
Значение микротвердости, HV	580	586	590	601	588	603
	565	602	620	596	605	595
	570	580	613	580	612	581
В среднем, HV	571.6	575	607.6	592.3	601.6	593

Низкие значения твердости полученных материалов после механохимического синтеза также свидетельствуют о недостаточности энергетики процесса. Продолжение механохимического нецелесообразно.

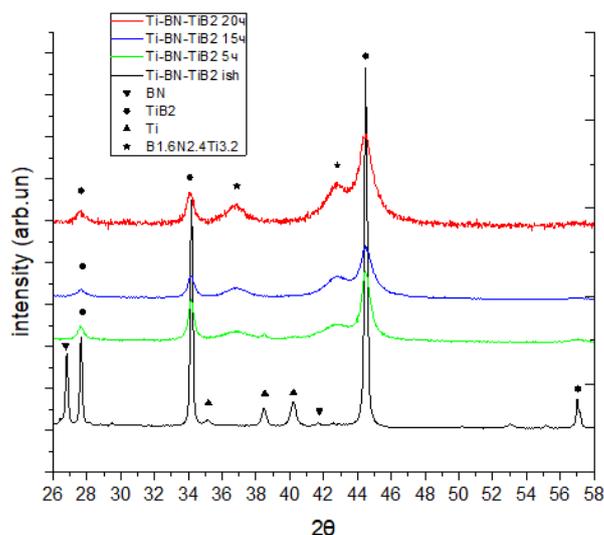


Рис. 2. Дифрактограммы смеси Ti – BN – TiB<sub>2</sub> (шихта №2) до и после механохимического синтеза (5 ч – зелёная, 15 ч – синяя, 20 ч – красная кривые)

Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the Ti – BN – TiB<sub>2</sub> mixture (mix. No. 2) before and after mechanochemical synthesis (5 h – green, 15 h – blue, 20 h – red curves)

### Серия экспериментов с шихтой № 2

Чтобы искоренить проблему с «нехваткой» энергоёмкости процесса и с для снижения длительности его проведения было решено провести синтез на «стыке» механики и химии. Исходными элементами было решено выбрать не нитрид титана и диборид титана, а металлический титан, нитрид бора и диборид титана в пропорциях, необходимых для синтеза соединения Ti<sub>3</sub>B<sub>2</sub>N (шихта № 2).

#### Механохимический синтез шихты №2

Как можно заметить, после 5 часов (рис. 2) механохимического синтеза Ti – BN – TiB<sub>2</sub> уже начинается частичное растворение Ti и BN между собой с образованием твердого раствора. Уширение пиков и уменьшение интенсивности является следствием одновременного протекания трёх процессов разной сущности:

а) химической реакции Ti с BN с образованием неравновесного соединения с общей формулой Ti<sub>a</sub>B<sub>b</sub>N<sub>c</sub>;

б) механическим (сугубо физическим) эффектом проникновения атомов вновь образованного соединения Ti<sub>a</sub>B<sub>b</sub>N<sub>c</sub> в решётку TiB<sub>2</sub> за счёт высокоэнергетического воздействия стальных шаров на частицы; в) химической реакции соединения Ti<sub>a</sub>B<sub>b</sub>N<sub>c</sub> и TiB<sub>2</sub> с образованием нового финишного соединения с общей формулой Ti<sub>d</sub>B<sub>e</sub>N<sub>f</sub>.

Также можно заметить, что после 5 часов механического легирования полностью исчезает пик металлического титана 2θ 40°. Существенного изменения рефлексов после 15 и 20 часов не обнаружено, что свидетельствует об окончании синтеза и нецелесообразности дальнейшей обработки с точки зрения химического синтеза, но не с точки зрения механической активации поверхности вновь образованных частиц.

После механического синтеза полученные материалы были спрессованы методом искрового плазменного спекания и определена твердость образцов. Материал, полученный в результате механохимического синтеза шихты №2, был подвергнут искровому плазменному спеканию.

В результате проведения sps дефектность кристаллической решетки заметно снизилась, о чем свидетельствует понижение значений полуширин всех пиков.

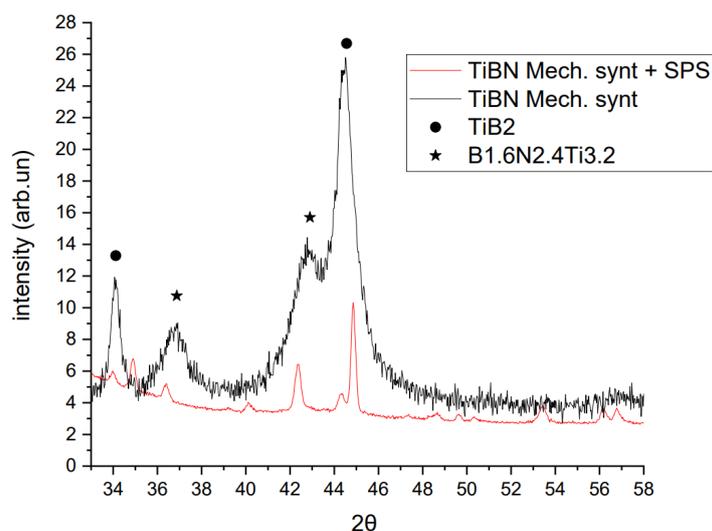


Рис. 3. Дифрактограммы смеси Ti – BN – TiB<sub>2</sub> (шихта №2) после механохимического синтеза (черная кривая) и после искрового плазменного спекания (красная кривая)

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of the Ti – BN – TiB<sub>2</sub> mixture (mix. No. 2) after mechanochemical synthesis (black curve) and after spark plasma sintering (red curve)

Значения микротвердости фрагментов прессовки SPS представлено в табл. 4.

Таблица 4

**Значения микротвердости фрагментов прессовки SPS продукта обработки шихты № 2**

Table 4

**Microhardness of the SPS product compact fragments mixture No. 1 after treatment**

№ фрагмента	1	2	3	4	5
Значение микротвердости, HV	1724	2256	1980	1753	2085
	1815	1914	1850	1680	1873
	1941	2040	2056	1696	1987
<b>В среднем, HV</b>	1826,6	2070	1962	1709,6	2221,6

Измерение проводили 5 раз для каждого фрагмента разрезанной прессовки после sps, после чего максимальные и минимальные значения отбрасывали, а из оставшихся вычисляли среднее арифметическое. Диапазон значений составляет от 1680 до 2256 МПа, а в среднем – 1957 Мпа.

Сопоставляя полученные значения твердости материала Ti-BN-TiB<sub>2</sub> со значениями, которые были получены при испытаниях материала TiN-TiB<sub>2</sub>, можно констатировать, что при равных режимах механической обработки наиболее целесообразно синтез проводить через реакцию Ti – BN – TiB<sub>2</sub>.

**Спрейная сушка и плазменная сфероидизация продукта, полученного в результате проведения механохимического синтеза шихты №2**

Основная проблема применения полученных соединений в качестве покрытий заключается в том, что размер их частиц недостаточно удобен для проведения плазменной сфероидизации и дальнейшего плазменного напыления. Вдобавок к этому, в процессе механического легирования происходит также и измельчение и без того хрупких материалов.

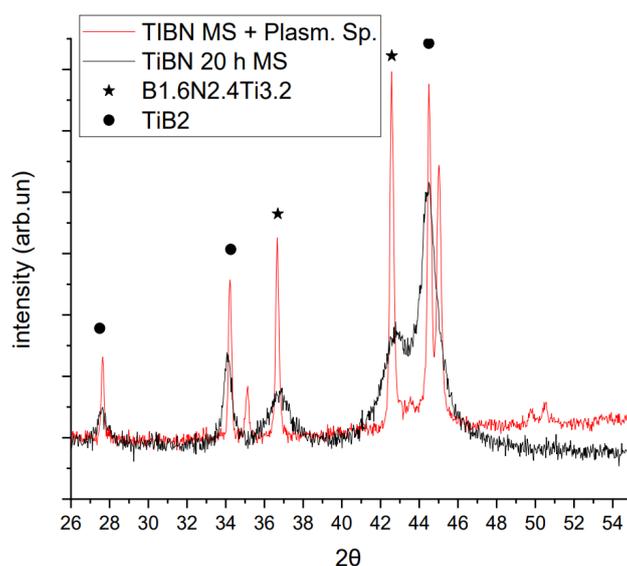


Рис. 4. Дифрактограммы смеси Ti – BN – TiB<sub>2</sub> (шихта №2) после механохимического синтеза (черная кривая) и после плазменной сфероидизации (красная кривая)

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of the Ti – BN – TiB<sub>2</sub> mixture (mix. No. 2) after mechanochemical synthesis (black curve) and after plasma spheroidization (red curve)

Чтобы решить проблему неподходящего грансостава для дальнейшей плазменной сфероидизации и последующего напыления, было решено провести эксперимент по спрейной сушке материала.

Таблица 5

Гранулометрический состав и технологические параметры полученных материалов

Table 5

Granulometric composition and technological parameters of the obtained materials

Обработка шихты № 2	Характеристические значения гранулометрического о состава, мкм			Технологические параметры порошков		
	d10	d50	d90	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность утряски, г/см <sup>3</sup>	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г
Механо-химический синтез	0,6	7,5	26,9	1,29	1,72	5688
Спрейная сушка	20	40	55	1,22	1,49	2658
Плазменная сфероидизация	20	42	76	1,64	2,15	1003

Вследствие приложения больших энергий в ходе механохимического синтеза происходит искажение кристаллической решетки, результатом чего является изменение межатомного расстояния и накопление внутренних дефектов.

В процессе сфероидизации происходит термообработка частиц в плазме, следствием чего является рекристаллизация материала. Из дифрактограммы материала после сфероидизации мож-

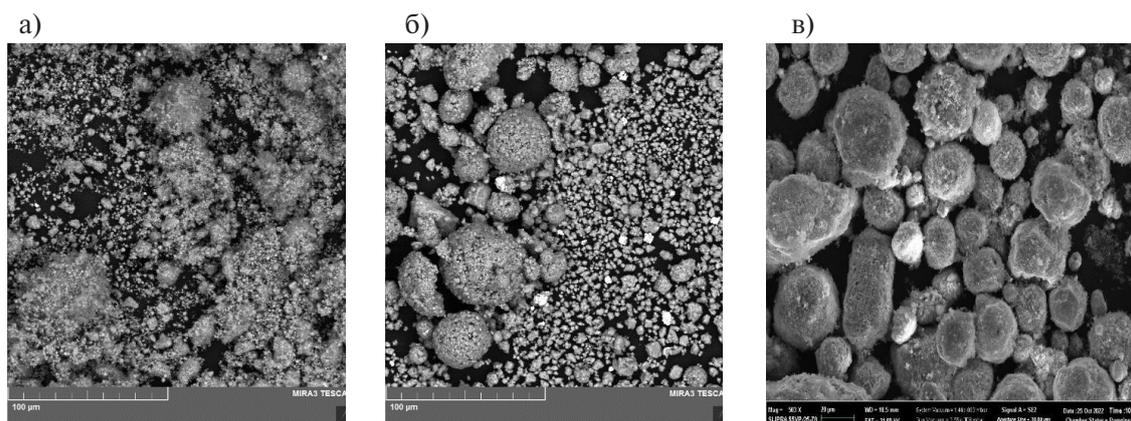


Рис. 5. Морфология поверхности полученных материалов, а – морфология поверхности  $Ti_3B_2N$  после МС, б – морфология поверхности  $Ti_3B_2N$  после механохимического синтеза и спрейной сушки, с – морфология поверхности  $Ti_3B_2N$  после механохимического синтеза, спрейной сушки и плазменной сфероидизации

Fig. 5. Surface morphology of the obtained materials, a –  $Ti_3B_2N$  surface morphology after MA, b –  $Ti_3B_2N$  surface morphology after mechanochemical synthesis and spray drying, c –  $Ti_3B_2N$  surface morphology after mechanochemical synthesis, spray drying and plasma spheroidization

но заметить, что происходит восстановление параметров кристаллической решетки и уменьшение полуширины пиков, отчего дифракционные рефлексы детектируют уменьшение количества ее дефектов.

Как видно из табл. 5, рис. 5, увеличение значений  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ , насыпной плотности, плотности утряски и удельной поверхности связано с эффектом консолидации частиц в процессе спрейной сушки. Полученный порошок подходит для дальнейшей плазменной сфероидизации.

На рис. 5 представлена морфология материала  $Ti_3B_2N$  после механохимического синтеза, последующей спрейной сушки и дальнейшей плазменной сфероидизации. Можно заметить изменение форм частиц от оскольчатой до практически сферической.

### Заключение

Проведённые исследования подтвердили принципиальную возможность получения соединений нитроборидов титана, а именно соединения  $B_{1.6}N_{2.4}Ti_{3.2}$  методом механохимического синтеза.

Отсутствие стехиометрического состава  $Ti_3B_2N$  после 20 часов механической обработки смеси  $TiN - TiB_2$  свидетельствует о том, недостаточности либо времени, либо энергонасыщенности процесса для синтеза. Однако, если в качестве исходных компонентов использовать не вышеуказанные бинарные соединения, а металлический титан, нитрид бора и диборид титана – время обработки можно уменьшить до 5 часов, по истечении которых уже образуется соединение, близкое по стехиометрии к искомому.

Диапазон значений твёрдости у полученных соединений после SPS составляет от 16800 до 22560 МПа, а в среднем – 19570 МПа.

Уникальность примененной технологии состоит в том, невзирая на отсутствие литературных источников по получению кем-либо ранее указанных соединений способами механохимического синтеза через реакцию  $Ti + BN + TiB_2$  с последующим SPS, плазменной сфероидизацией и спрейной сушкой, в результате настоящего исследования произведён синтез материала, пригодного для дальнейшего применения в качестве напыляемых покрытий.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Иванова Н.М.** ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИНИТРИДОВ ТИТАНА, ОСАЖДЕННЫЕ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ: МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ / Н.М. Иванова [и др.] // XX Международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ» Секция 12: Наноматериалы, нанотехнологии и новая энергетика – Томск, 2011. – С. 327–328.
- [2] **Kovarik O.** Mechanical properties and fatigue crack growth in tungsten deposited by RF-plasma // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 410.
- [3] **Tian J.J.** Effect of coating composition on the micro-galvanic dissolution behavior and antifouling performance of plasma-sprayed laminated-structured CuTi composite coating / Tian J.J. [and oth.] // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 410.
- [4] **Luo X.Y.** In vitro analysis of cell compatibility of TiCuN films with different Cu contents / Luo, X. Y. [and oth.] // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 408.
- [5] **Rahmati Z.** Effects of pre-heat treatment of the consumable rod on the microstructural and mechanical properties of the friction surfaced Al-Cu-Mg alloy over pure aluminum / Rahmati Z. [and oth.] // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 410.
- [6] **Shahedi Asl M.** Reactive spark plasma sintering of TiB<sub>2</sub>–SiC–TiN novel composite/ M. Shahedi Asl. [and oth.] // Int. J. Refract. Metals Hard Mater – 2019 – P. 119–126.
- [7] **Ghafuri F.** Effects of SPS parameters on the densification and mechanical properties of TiB<sub>2</sub>-SiC composite / F. Ghafuri. [and oth.] // Ceram. Int. 45 –2019 – P. 10550–10557.
- [8] **Gissler W.** Structure and properties of Ti-B-N coatings // Surface and Coatings Technology, 68–69(C) – 1994 – P. 556–563.
- [9] **Hammer P.** Titanium boron nitride coatings of very high hardness // Surface and Coatings Technology. – 1994 – P. 194–198.
- [10] **Mollart T.P.** Tribological behaviour of homogeneous Ti-B-N, Ti-B-N-C and TiN/h-BN/TiB<sub>2</sub> multi-layer coatings // Surface and Coatings Technology, 86–87 (PART 1). – 1996 – P. 231–236.
- [11] **Nguyen V.H.** Role of co-addition of BN and SiC on microstructure of TiB<sub>2</sub>-based composites densified by SPS method // Ceramics International, 46 (16). – 2020 – P. 25341–25350.
- [12] **Ahmadi B.** Densification improvement of spark plasma sintered TiB<sub>2</sub>-based composites with micron-, submicron- and nano-sized SiC particulates // Ceram. Int.– 2018 – P. 11431.
- [13] **Zhou S.Y., Pelenovich V.O., Han B., Yousaf M.I., Yan S.J., Tian C.X., Fu D.J.** Effects of modulation period on microstructure, mechanical properties of TiBN/TiN nanomultilayered films deposited by multi arc ion plating. Vacuum 2016, 126, 34–40.
- [14] **Lin J., Moore J.J., Mishra B., Pinkas M., Sproul W.D.** The structure and mechanical and tribological properties of TiBCN nanocomposite coatings. Acta Mater. 2010, 58, 1554–1564.
- [15] **Kurooka S., Ikeda T., Kohama K., Tanaka T., Tanaka A.** Formation and characterization of BN films with Ti added. Surf. Coat. Technol. 2003, 166, 111–116.
- [16] **Holzschuh H.** Deposition of Ti-B-N (single and multilayer) and Zr-B-N coatings by chemical vapor deposition techniques on cutting tools. Thin Solid Films 2004, 469–470, 92–98.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ТРОЦКИЙ Михаил Вадимович** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: m\_trotsky.ru@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9178-2807>

**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>

**КАМИНСКИЙ Владимир Владимирович** – заведующий лабораторией, Университет ИТМО, канд. физ.-мат. наук.

E-mail: vvkaminskii@itmo.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4388-2459>

**ПЕТРОВИЧ Сергей Юрьевич** – заведующий лабораторией, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: lmpa2010-new@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5391-9024>

## REFERENCES

- [1] **N.M. Ivanova**, COATINGS BASED ON TITANIUM OXYNITRIDES DEPOSITED BY THE METHOD OF REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING: SURFACE MORPHOLOGY AND CHEMICAL COMPOSITION / N.M. Ivanova [and others] // XX International Scientific and Practical Conference "MODERN TECHNOLOGY AND TECHNOLOGIES" Section 12: Nanomaterials, nanotechnologies and new energy – Tomsk, 2011. – P. 327–328.
- [2] **O. Kovarik**, Mechanical properties and fatigue crack growth in tungsten deposited by RF-plasma // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 410.
- [3] **J.J. Tian**, Effect of coating composition on the micro-galvanic dissolution behavior and antifouling performance of plasma-sprayed laminated-structured CuTi composite coating / Tian J.J. [and oth.] // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 410.
- [4] **X.Y. Luo**, In vitro analysis of cell compatibility of TiCuN films with different Cu contents / Luo X.Y. [and oth.] // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 408.
- [5] **Z. Rahmati**, Effects of pre-heat treatment of the consumable rod on the microstructural and mechanical properties of the friction surfaced Al-Cu-Mg alloy over pure aluminum / Rahmati Z. [and oth.] // Surface and Coatings Technology – 2021 – P. 410.
- [6] **M. Shahedi Asl.**, Reactive spark plasma sintering of TiB<sub>2</sub>-SiC-TiN novel composite / M. Shahedi Asl. [and oth.] // Int. J. Refract. Metals Hard Mater – 2019 – P. 119–126,
- [7] **F. Ghafari**, Effects of SPS parameters on the densification and mechanical properties of TiB<sub>2</sub>-SiC composite / F. Ghafari. [and oth.] // Ceram. Int. 45 –2019 – P. 10550–10557.
- [8] **W. Gissler**, Structure and properties of Ti-B-N coatings // Surface and Coatings Technology, 68–69 (C) – 1994 – P. 556–563.
- [9] **P. Hammer**, Titanium boron nitride coatings of very high hardness // Surface and Coatings Technology. – 1994 – P. 194–198.
- [10] **T.P. Mollart**, Tribological behaviour of homogeneous Ti-B-N, Ti-B-N-C and TiN/h-BN/TiB<sub>2</sub> multi-layer coatings // Surface and Coatings Technology, 86–87(PART 1). – 1996 – P. 231–236.
- [11] **V.H. Nguyen**, Role of co-addition of BN and SiC on microstructure of TiB<sub>2</sub>-based composites densified by SPS method // Ceramics International, 46 (16). – 2020 – P. 25341–25350.
- [12] **B. Ahmadi**, Densification improvement of spark plasma sintered TiB<sub>2</sub>-based composites with micron-, submicron- and nano-sized SiC particulates // Ceram. Int.– 2018 – P. 11431.
- [13] **S.Y. Zhou, V.O. Pelenovich, B. Han, M.I. Yousaf, S.J. Yan, C.X. Tian, D.J. Fu**, Effects of modulation period on microstructure, mechanical properties of TiBN/TiN nanomultilayered films deposited by multi arc ion plating. Vacuum 2016, 126, 34–40.

- [14] **J. Lin, J.J. Moore, B. Mishra, M. Pinkas, W.D. Sproul**, The structure and mechanical and tribological properties of TiBCN nanocomposite coatings. *Acta Mater.* 2010, 58, 1554–1564.
- [15] **S. Kurooka, T. Ikeda, K. Kohama, T. Tanaka, A. Tanaka**, Formation and characterization of BN films with Ti added. *Surf. Coat. Technol.* 2003, 166, 111–116.
- [16] **H. Holzschuh**, Deposition of Ti-B-N (single and multilayer) and Zr-B-N coatings by chemical vapor deposition techniques on cutting tools. *Thin Solid Films* 2004, 469–470, 92–98.

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Mikhail V. TROTSKY** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: m\_trotsky.ru@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9178-2807>

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

**Vladimir V. KAMINSKII** – *ITMO University.*

E-mail: vvkaminskii@itmo.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4388-2459>

**Sergey Yu. PETROVICH** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: Impa2010-new@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5391-9024>

Поступила: 07.08.2023; Одобрена: 07.09.2023; Принята: 10.09.2023.

Submitted: 07.08.2023; Approved: 07.09.2023; Accepted: 10.09.2023.

Научная статья

УДК 621.89.017

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>



М.Г. Евсин ✉

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

✉ [mark.evsin1995@yandex.ru](mailto:mark.evsin1995@yandex.ru)

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФТОРИДОМ ГРАФЕНА

*Аннотация.* В статье изучено влияние фторида графена на структуру и свойства пластичных смазок методами оптической микроскопии, ротационной вискозиметрии и трибометрии. Трибологические свойства базовых и модифицированных смазочных композиций оценены с помощью четырехшариковой машины трения по основным показателям: среднему диаметру пятна износа, индексу задира, критической нагрузке и нагрузке сваривания. Реологические исследования показали, что введение фторида графена в исследованные базовые смазочные композиции повысило их вязкостные свойства и оказало положительное влияние на прочность каркасной структуры загустителя. Исследование микроструктуры образцов показало, что фторид графена является активным компонентом системы и участвует в процессе структурообразования пластичных смазок. Испытания показали улучшение трибологических свойств модифицированных смазочных композиций. Была подтверждена перспективность применения фторида графена в качестве модификатора трения для пластичных смазок.

*Ключевые слова:* фторид графена, пластичная смазка, ротационный вискозиметр, четырехшариковая машина трения.

*Благодарности:* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

*Для цитирования:*

Евсин М.Г. Реологические и трибологические свойства смазочных композиций, модифицированных фторидом графена // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>

M.G. Evsin ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia✉ [mark.evsin1995@yandex.ru](mailto:mark.evsin1995@yandex.ru)

## RHEOLOGICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF GRAPHENE FLUORIDE MODIFIED LUBRICATING COMPOSITIONS

**Abstract.** The article studies the influence of graphene fluoride on the structure and properties of greases by optical microscopy, rotational viscometry and tribometry. The tribological properties of the basic and modified lubricating compositions were evaluated using a four-ball friction tester according to the main indicators: the average diameter of the wear spot, the load-wear index, the critical load and the welding load. Rheological studies showed that the introduction of graphene fluoride into the studied basic lubricating compositions increased their viscosity properties and had a positive effect on the strength of the frame structure of the thickener. The study of the microstructure of the samples showed that graphene fluoride is an active component of the system and participates in the process of structure formation of greases. Tests showed an improvement in the tribological properties of modified lubricating compositions. The prospects of using graphene fluoride as a friction modifier for greases was confirmed.

**Keywords:** Graphene fluoride, grease, rotary viscometer, four-ball friction tester.

**Acknowledgements:** Russian Science Foundation Grant No. 22-19-00178.

**Citation:**

M.G. Evsin, Rheological and tribological properties of graphene fluoride modified lubricating compositions, *Global Energy*, 29 (03) (2023) 124–133, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29309>

**Введение.** В настоящее время на заводах, занимающихся производством паровых турбин, наблюдается тенденция к переходу от гидравлических элементов парораспределения в сторону применения электромеханических приводов (ЭМП) [1]. К новым ЭМП предъявляются такие технические требования как: высокая скорость и точность перемещения рабочего органа (клапана), высокое усилие во всём диапазоне перемещения клапана и низкое энергопотребление. Достижению таких характеристик способствует применение новых смазочных композиций.

В технических системах, для которых характерен переменный режим работы с периодами простоя, целесообразно применять пластичные смазки (ПС), которые за счет каркасной структуры загустителя [2] способны длительное время удерживаться в зоне контакта. Помимо свойств базового масла и загустителя, важное влияние на эффективность применения ПС оказывают модификаторы трения – присадки [3, 4].

В последние годы одними из наиболее перспективных модификаторов трения являются вещества на основе графена. Со времени открытия способа получения графена было проведено множество исследований его физических и, в том числе, трибологических свойств. Исследования показали, что графен при использовании в качестве присадки, снижает коэффициент трения и повышает адгезионные свойства смазок. Также применение графена позволяет повысить теплопроводность смазки [5–9], что является важным фактором при работе высоконагруженных узлов трения.

На данный момент уже разработано множество технологий получения графена [10–12]. В основном для промышленного применения синтезируется оксид графена [6, 13, 14]. При этом своё развитие получают и альтернативные материалы на основе графена. Известен фторид графена, который, по многим параметрам превосходит оксид [15–18]. Предполагается, что содержание фтора в структуре позволяет повысить антифрикционные свойства материала, а также повысить водостойкость смазки [15].

Целью исследования являлось изучение влияния фторида графена на реологические и трибологические свойства пластичных смазочных композиций на базе Литола-24 и Солидола для применения в электромеханических приводах при производстве паровых турбин.

### Методика и материалы

Для достижение высоких технических характеристик в указанных условиях эксплуатации были исследованы смазочные композиции на основе Литола-24 и Солидола (табл. 1).

Таблица 1

**Состав исследованных пластичных смазочных композиций**

Table 1

**Composition of the investigated greases**

Маркировка пластичной смазки		Базовое масло	Загуститель	Дисперсная добавка
I	Литол-24	минеральное масло, (85 мас. %)	литиевое мыло 12-оксистеариновой кислоты (15 мас. %)	–
II	Литол-24 + FG	минеральное масло, (85 мас. %)	литиевое мыло 12-оксистеариновой кислоты (15 мас. %)	фторид графена 0,3 масс. %
III	Солидол	минеральное масло (80 мас. %),	кальциевое мыло высших жирных кислот (20 мас. %)	–
IV	Солидол + FG	минеральное масло (80 мас. %),	кальциевое мыло высших жирных кислот (20 мас. %)	фторид графена 0,3 масс. %

Пластические смазки на основе литола-24 (I) и солидола (III), широко используются для высоконагруженных узлов и для узлов, подверженных контакту с водой, соответственно. Эксплуатационные свойства модифицированных фторидом графена пластических смазок на основе литола-24 (II) и солидола (IV), в настоящее время недостаточно изучены.

Образцы смазок были подготовлены механическим перемешиванием. Соотношение базовой смазочной композиции и модификатора определялось с помощью лабораторных весов с точностью до 1 мг.

Трибологические исследования проводились по ГОСТ 9410-75 и ГОСТ 32501-2013 на четырехшариковой машине трения ЧШМ – 3,2. Исследование методом оптической микроскопии проводилось с применением микровизора металлографического инвертированного  $\mu$ Vizo-Met-221. Измерение температуры в зоне испытаний производилось с помощью цифрового мультиметра UT61B UNI-T и термопары типа К, а также встроенных датчиков использованных приборов. Реологические исследования проводились согласно методике ГОСТ 25271-93 с помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV2T с применением встроенного программного обеспечения и сторонних программных комплексов.

При проведении испытаний на ЧШМ – 3.2, образцы ПС помещались в чашу таким образом, чтобы шарики полностью были погружены в смазочный материал. Испытания проводились в две серии. Испытания в первой серии длились 10 с и проводились в широком интервале нагрузок от

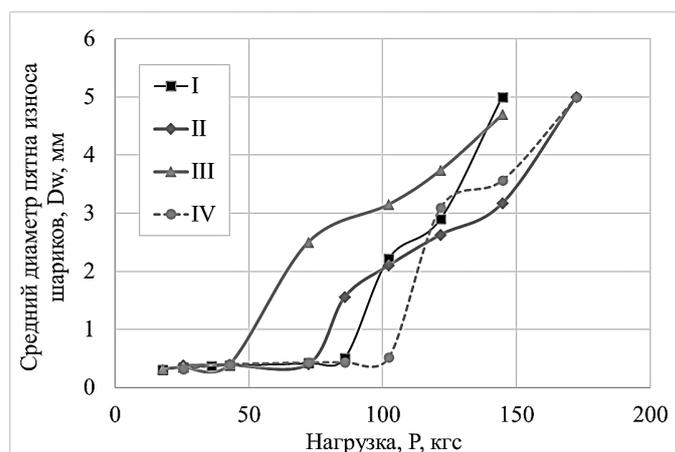


Рис. 1. Средний диаметр пятен износа шариков при испытании в течении 10 с в исследованных пластичных смазках I – IV

Fig. 1. Average diameter of the balls wear spots during a test for 10 seconds in the studied greases I – IV

20 до 200 кгс. Для каждой пробы ПС были проведены от 8 до 15 испытаний с увеличением нагрузки до момента сваривания шариков. Определялся индекс задира ( $I_3$ ), критическая нагрузка ( $P_{кр}$ ) и нагрузка сваривания ( $P_{св}$ ). Во второй серии были проведены по 5 испытаний длительностью в 1 час при нагрузке 20 кгс. В результате был измерен средний диаметр пятна износа ( $D_w$ ) и рассчитан показатель износа шариков ( $D_n$ ).

При проведении испытаний на ротационном вискозиметре, образец ПС был помещен в химический стакан. Производилось термостатирование образца ПС и контактирующих с ним частей прибора до достижения температуры  $25 \pm 0,2^\circ\text{C}$ . Использовался шпиндель №7 по ГОСТ 25271-93, описанный в приложении Б. С образцами каждой смазочной композиции были проведены минимум по три серии испытаний. Для определения предела текучести был проведен анализ кривых «напряжение сдвига – угловая скорость». На основе полученных значений были вычислены скорости сдвига и соответствующие им значения вязкости.

### Результаты и их обсуждение

В ходе трибологических испытаний исследовался средний диаметр пятна износа шариков. По результатам серии испытаний с последовательно увеличивающейся нагрузкой были построены графики зависимости значения диаметра пятна износа от прилагаемой нагрузки (рис. 1). Результаты двух серий испытаний показали (табл. 2), что наилучшим влиянием на износостойкость ( $D_n$ ), наибольшим индексом задира ( $I_3$ ), критической нагрузкой ( $P_{кр}$ ) и нагрузкой сваривания ( $P_{св}$ ) обладали образцы ПС, модифицированные графеном (II и IV). Это говорит о повышении предельной работоспособности модифицированных смазочных композиций.

Для определения влияния модификатора на структуру базовой смазочной композиции было проведено исследование методом оптической микроскопии. Результаты исследования представлены на рис. 2.

Добавление фторида графена (II) к базовой смазочной композиции (I) привело к уменьшению ячейки каркасной структуры, увеличению предела текучести и вязкости (табл. 2). Это показывает, что фторид графена является активным компонентом системы и участвует в процессе структурообразования ПС.

Для расширения теоретических знаний о механических свойствах исследованных образцов и прогнозирования их эксплуатационных характеристик было проведено исследование методом ротационной вискозиметрии (рис. 3).

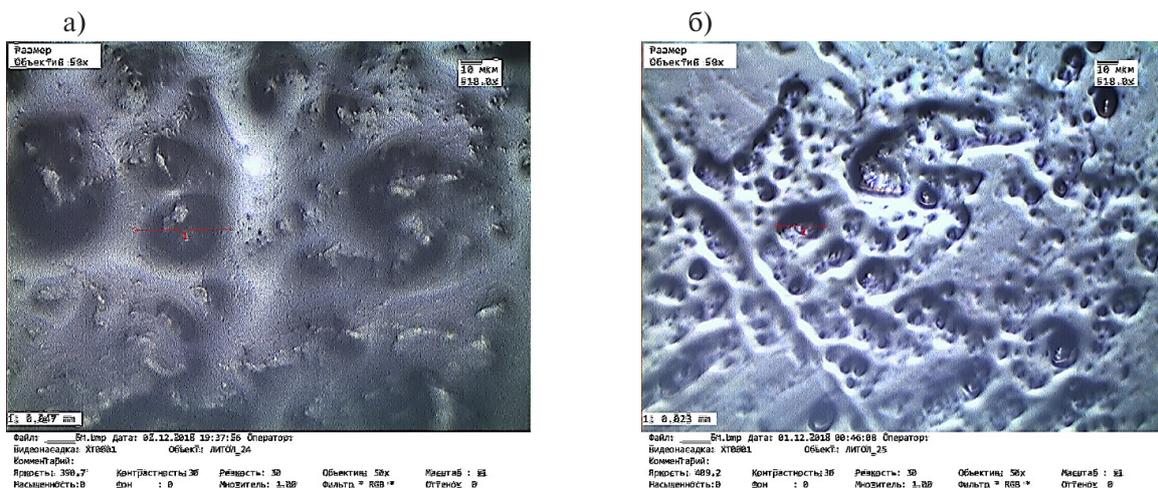


Рис. 2. Микроскопическое исследование каркасной структуры: а) базовая смазочная композиция (I); б) смазочная композиция, модифицированная фторидом графена (II)

Fig. 2. Microscopic investigation of the frame structure: a) basic lubricant composition (I); b) lubricant composition modified with graphene fluoride (II)

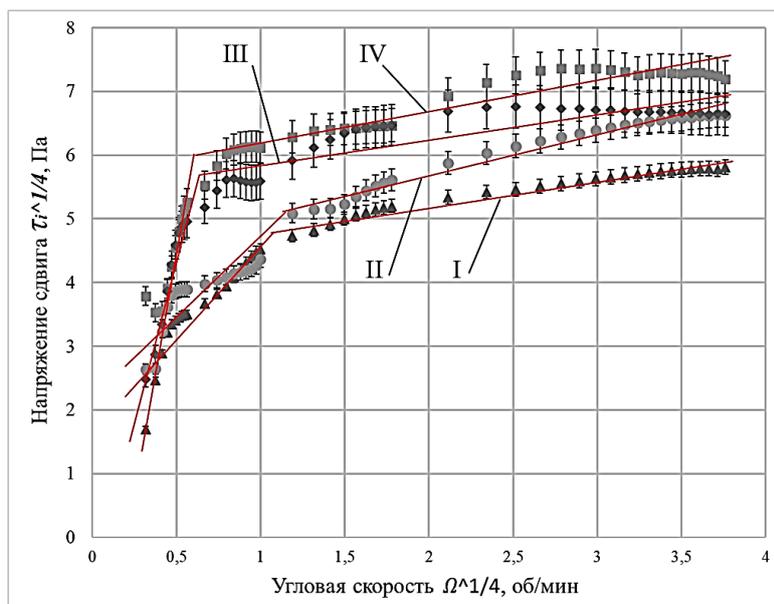


Рис. 3. Реологические кривые исследованных смазочных композиций

Fig. 3. Rheological curves of the investigated lubricating compositions

Полученные данные свидетельствуют о неньютоновских свойствах исследуемых образцов. Для проведения анализа полученных результатов были построены реологические кривые в системе напряжение сдвига – угловая скорость с показателем коэффициента нелинейности 0,25. Полученные кривые имели точки перегиба и были аппроксимированы в виде двух линейных отрезков. Продлив второй отрезок к оси сдвигового напряжения, были определены значения предела текучести для каждой ПС. Наибольшим пределом текучести (табл. 2) обладал образец IV, что говорит о высокой структурной прочности каркаса загустителя. Исследованные модифицированные смазочные композиции показали пределы текучести выше, чем у базовых образцов ПС.

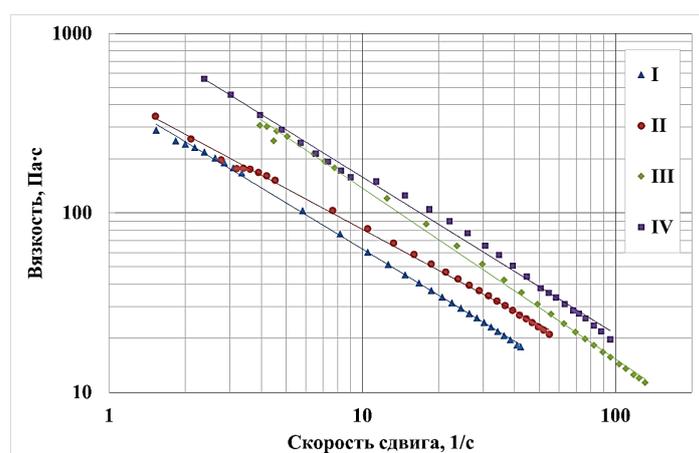


Рис. 4. Кривые вязкости в логарифмических координатах

Fig. 4. Viscosity curves in logarithmic coordinates

Применив полученные значения пределов текучести, были рассчитаны радиусы областей смазки, проявляющих жидкостные свойства. Это позволило рассчитать значения градиента скорости сдвига, соответствующие измеренным напряжениям сдвига. Для этих скоростей сдвига была вычислена вязкость. Полученные кривые вязкости в логарифмических координатах представлены на рис. 4.

На исследуемом интервале, вязкость модифицированных смазочных композиций была выше, чем у базовых. При этом в паре образцов I – II угол наклона логарифмической кривой к оси скорости сдвига уменьшился. В паре образцов III – IV угол наклона логарифмической кривой к оси скорости сдвига увеличился. Это может свидетельствовать об уменьшении и увеличении псевдопластичности, соответственно.

Таблица 2

### Реологические и трибологические характеристики исследованных ПС

Table 2

#### Rheological and tribological characteristics of the investigated greases

Обозначение смазочной композиции	Предел текучести, $\tau_0$ , Па	Вязкость ( $D = 100 \text{ с}^{-1}$ ), Па·с	Показатель износа ( $D_{и}$ ), мм	Индекс задира ( $I_3$ ), кгс	Критическая нагрузка ( $P_k$ ), кгс	Нагрузка сваривания ( $P_{св}$ ), кгс
I	383	8,3	1,01	29	102	145
II	385	14,7	0,5	48	125	178
III	955	16,4	0,71	35	110	145
IV	1110	22,1	0,63	68	122	178

Данные, полученные в результате трибологических и реологических исследований (табл. 2), согласуются с предположением об увеличении несущей способности смазки при увеличении её вязкостных характеристик.

### Выводы

Трибологические исследования показали, что модификации базовых пластичных смазочных композиций фторидом графена привели к снижению показателя износа на 50 и 13 % для пары

образцов I-II и III-IV соответственно. Индекс задира увеличился на 65% и 94% для пары образцов I-II и III-IV соответственно. Критическая нагрузка в первой паре образцов увеличилась на 23%, а во второй паре увеличилась на 11%. Нагрузка сваривания увеличилась на 23% для обеих пар образцов ПС.

Результаты исследования в целом показали повышение трибологических характеристик модифицированных смазочных систем по сравнению с базовыми. Это говорит о положительном влиянии фторида графена на реологические и трибологические свойства пластичных смазочных композиций на базе Литола-24 и Солидола для применения в электромеханических приводах паровых турбин.

Полученные результаты согласуются с результатами других исследований, а также с общепринятыми теоретическими моделями.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Турецков А.В.** Разработка и совершенствование современной системы парораспределения теплофикационной турбины: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.04.12: дис. – б. и., 2021.

[2] **Fan X., Li W., Li H., Zhu M., Xia Y., Wang J.** Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases // *Tribology International*. 2018. Vol. 118. P. 128–139.

[3] **Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А., Фадин Ю.А., Александров С.Е., Провоторов Д.А., Стариков Н.Е.** Противоизносные свойства консистентного смазочного композиционного материала, содержащего смесь гидросиликатов магния. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и Технологии*. 2016. № 2 (19). С. 30–40.

[4] **Медведева В.В., Бреки А.Д., Крылов Н.А., Скотникова М.А., Фадин Ю.А., Александров С.Е., Агеев Е.В.** Исследование противоизносных свойств пластичного смазочного композиционного материала, содержащего дисперсные частицы слоистого модификатора трения // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2016. № 1 (64). С. 75–82.

[5] **Аль-Саади Д., Али Ю., Першин В. Ф., Дивин А.Г., Мозгова Г.В., Остриков В.В.** Определение коэффициента теплопроводности для пластичных смазок, модифицированных графеном // *Наука в центральной России*. 2017. № 5 (29). С. 75–83. EDN ZOLBRB.

[6] **Jyothirmayee Aravind S.S., Ramaprabhu S.** Surfactant free grapheme nanosheets based nanofluids by in-situ reduction of alkaline graphite oxide suspensions. *Journal of applied physics*, vol. 110, no. 12, pp. 124326–124326–5, dec. 2011.

[7] **Jha N., Ramaprabhu S.** Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluids. *Journal of applied physics*, vol. 106, no. 8, pp. 084317–084317–6, oct. 2009.

[8] **Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S.** Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (al<sub>2</sub>o<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement // *Applied physics letters*, vol. 87, no. 15, p. 153107, 2005.

[9] **Xie H., Chen L.** Adjustable thermal conductivity in carbon nanotube nanofluids/ *physics letters a*, vol. 373, no. 21, pp. 1861–1864, may 2009.

[10] **Lim J. Y., Mubarak N.M., Abdullah E.C., Nizamuddin S., Khalid M.** Recent trends in the synthesis of graphene and graphene oxide based nanomaterials for removal of heavy metals — A review // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018. T. 66. С. 29–44.

[11] **Smith A.T., LaChance A.M., Zeng S., Liu B., Sun L.** Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites // *Nano Materials Science*. 2019. T. 1. №. 1. С. 31–47.

- [12] Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. Графен. Методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. №. 3. С. 233–268.
- [13] Шилов М.А., Смирнова А.И., Гвоздев А.А., Рожкова Н.Н., Дьячкова Т.П., Бурков А.А., Усольцева Н.В. Реология пластичных смазочных материалов с присадками углеродных наноструктур различного типа // Трение и износ. 2019. Т. 40. №. 6. С. 720.
- [14] Парфенов А.С., Шилов М.А., Смирнова А.И., Берёзина Е.В., Ткачев А.Г., Бурков А.А., Усольцева Н.В. Влияние различных аллотропов углерода на трибологические и реологические характеристики модельных смазочных систем // Трение и износ. 2021. Т. 42. №. 3. С. 338–349.
- [15] Васильев И.М., Агамирова Э.Э., Соколова В.А., Ореховская А.А., Загидуллин Р.Р., Киямов И.К., Сабитов Л.С. Исследование возможностей применения смазочных материалов на основе фторида графена в машиностроении и эксплуатации машин и механизмов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. №. 8. С. 417–426.
- [16] Kouloumpis A., Chronopoulos D.D., Potsi G., Pykal M., Vlček J., Scheibe M., Otyepka M. One-step synthesis of Janus fluorographene derivatives // Chemistry—A European Journal. 2020. Т. 26. №. 29. С. 6518–6524.
- [17] Нагдаев В.К., Вязинкин В.С., Забродская А.В., Остриков В.В., Сафонов В.В., Першин В.Ф. Результаты исследований смазки, модифицированной многослойным графеном // Наука в центральной России. 2021. №. 2. С. 71–77.
- [18] Aghamohammadi H., Bakhtiari M., Eslami-Farsani R. An experimental investigation on the synthesis of fluorographene by electrochemical method in the mixture of sulfuric and hydrofluoric acid electrolytes // Ceramics International. 2020. Т. 46. №. 16. С. 25189–25199.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ЕВСИН Марк Геннадьевич** – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: mark.evsin1995@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2403-9386>

## REFERENCES

- [1] A.V. Turetskov, Razrabotka i sovershenstvovaniye sovremennoy sistemy paroraspredeleniya teplofikatsionnoy turbiny: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk (Development and improvement of a modern steam distribution system of a heating turbine: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences): 05.04.12: dis. – b. i., 2021.
- [2] X. Fan, W. Li, H. Li, M. Zhu, Y. Xia, J. Wang, Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases // Tribology International. 2018. Vol. 118. P. 128–139.
- [3] V.V. Medvedeva, A.D. Breki, N.A. Krylov, Yu.A. Fadin, S.Ye. Aleksandrov, D.A. Provotorov, N.Ye. Starikov, Protivoiznosnyye svoystva konsistentnogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala, sodержashchego smes gidrosilikatov magniya (Anti-wear properties of a lubricating composite material containing a mixture of magnesium hydrosilicates) // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tekhnika i Tekhnologii. 2016. №2(19). S. 30–40.
- [4] V.V. Medvedeva, A.D. Breki, N.A. Krylov, M.A. Skotnikova, Yu.A. Fadin, S.Ye. Aleksandrov, Ye.V. Ageyev, Issledovaniye protivnoiznosnykh svoystv plastichnogo smazochnogo kompozitsionnogo materiala, sodержashchego dispersnyye chastitsy sloistogo modifikatora treniya (Investigation of anti-wear properties of a plastic lubricating composite material containing dispersed particles of a layered friction modifier) // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 1 (64). S. 75–82.

[5] **D. Al-Saadi, Yu. Ali, V. F. Pershin, A.G. Divin, G.V. Mozgova, V.V. Ostrikov**, *Opredeleniye koeffitsiyenta teploprovodnosti dlya plastichnykh smazok, modifitsirovannykh grafenom (Determination of the thermal conductivity coefficient for graphene modified greases) // Nauka v tsentralnoy Rossii. 2017. № 5 (29). S. 75–83. EDN ZOLBRB.*

[6] **S.S. Jyothirmayee Aravind, S. Ramaprabhu**, *Surfactant free grapheme nanosheets based nanofluids by in-situ reduction of alkaline graphite oxide suspensions. Journal of applied physics, vol. 110, no. 12, pp. 124326–124326–5, dec. 2011.*

[7] **N. Jha, S. Ramaprabhu**, *Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluids. Journal of applied physics, vol. 106, no. 8, pp. 084317–084317–6, oct. 2009.*

[8] **C.H. Chon, K.D. Kihm, S.P. Lee, S.U.S. Choi**, *Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (al2o3) thermal conductivity enhancement // Applied physics letters, vol. 87, no. 15, p. 153107, 2005.*

[9] **H. Xie, L. Chen**, *Adjustable thermal conductivity in carbon nanotube nanofluids/ physics letters a, vol. 373, no. 21, pp. 1861–1864, may 2009.*

[10] **J.Y. Lim, N.M. Mubarak, E.C. Abdullah, S. Nizamuddin, M. Khalid**, *Recent trends in the synthesis of graphene and graphene oxide based nanomaterials for removal of heavy metals — A review // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2018. T. 66. S. 29–44.*

[11] **A.T. Smith, A.M. LaChance, S. Zeng, B. Liu, L. Sun**, *Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites // Nano Materials Science. 2019. T. 1. №. 1. S. 31–47.*

[12] **A.V. Yeletskiy, I.M. Iskandarova, A.A. Knizhnik, D.N. Krasikov**, *Grafen. Metody polucheniya i teplofizicheskiye svoystva (Graphene. Methods of production and thermophysical properties) // Uspekhi fizicheskikh nauk. 2011. T. 181. №. 3. S. 233–268.*

[13] **M.A. Shilov, A.I. Smirnova, A.A. Gvozdev, N.N. Rozhkova, T.P. Dyachkova, A.A. Burkov, N.V. Usoltseva**, *Reologiya plastichnykh smazochnykh materialov s prisadkami uglerodnykh nanostruktur razlichnogo tipa (Rheology of plastic lubricants with additives of carbon nanostructures of various types) // Treniye i iznos. 2019. T. 40. №. 6. S. 720.*

[14] **A.S. Parfenov, M.A. Shilov, A.I. Smirnova, Ye.V. Berezina, A.G. Tkachev, A.A. Burkov, N.V. Usoltseva**, *Vliyaniye razlichnykh allotropov ugleroda na tribologicheskiye i reologicheskiye kharakteristiki modelnykh smazochnykh system (Influence of various carbon allotropes on tribological and rheological characteristics of model lubrication systems) // Treniye i iznos. 2021. T. 42. №. 3. S. 338–349.*

[15] **I.M. Vasilyev, E.E. Agamirova, V.A. Sokolova, A.A. Orekhovskaya, R.R. Zagidullin, I.K. Kiyamov, L.S. Sabitov**, *Issledovaniye vozmozhnostey primeneniya smazochnykh materialov na osnove fluorida grafena v mashinostroyenii i ekspluatatsii mashin i mekhanizmov (Investigation of the possibilities of using graphene fluoride lubricants in mechanical engineering and operation of machines and mechanisms) // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2022. №. 8. S. 417–426.*

[16] **A. Kouloumpis, D.D. Chronopoulos, G. Potsi, M. Pykal, J. Vlček, M. Scheibe, M. Otyepka**, *One-step synthesis of Janus fluorographene derivatives // Chemistry—A European Journal. 2020. T. 26. №. 29. S. 6518–6524.*

[17] **V.K. Nagdayev, V.S. Vyazinkin, A.V. Zabrodskaya, V.V. Ostrikov, V.V. Safonov, V.F. Pershin**, *Rezultaty issledovaniy smazki, modifitsirovannoy mnogosloynym grafenom (Results of studies of a lubricant modified with multilayer graphene) // Nauka v tsentralnoy Rossii. 2021. №. 2. S. 71–77.*

[18] **H. Aghamohammadi, M. Bakhtiari, R. Eslami-Farsani**, *An experimental investigation on the synthesis of fluorographene by electrochemical method in the mixture of sulfuric and hydrofluoric acid electrolytes // Ceramics International. 2020. T. 46. №. 16. S. 25189–25199.*

### INFORMATION ABOUT AUTHOR

**Mark G. EVSIN** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: mark.evsin1995@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2403-9386>

**Поступила: 07.08.2023; Одобрена: 08.09.2023; Принята: 10.09.2023.**

**Submitted: 07.08.2023; Approved: 08.09.2023; Accepted: 10.09.2023.**