

Том 27, №4, 2021



Материаловедение. Энергетика

Санкт-Петербург

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА MATERIALS SCIENCE. POWER ENGINEERING

(ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ, академик РАН

Александров М.Л., член-корр. РАН

Згуровский М.З., ин. член РАН, академик НАН Украины

Клименко А.В., академик РАН

Костюк В.В., академик РАН

Лагарьков А.Н., академик РАН

Окрепилов В.В., академик РАН

Рудской А.И., академик РАН

Саркисов А.А., академик РАН

Федоров М.П., академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, научный руководитель
СПбПУ, академик РАН

Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук,
профессор СПбПУ

Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Башкарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации
СПбПУ

Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ

Забонин В.Н., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Каляев И.А., д-р техн. наук, академик РАН

Колсун Михал, профессор Технического университета
г. Кошице (Словакия)

Кириллов А.И., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор Бранденбургского
ТУ (Германия)

Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор Ченстоховского
политехнического университета (Польша)

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

Сергеев В.В., д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый
проректор СПбПУ

Тендлер М.Б., ин. член РАН, KTH Royal Institute
of Technology (Швеция)

Титков В.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

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

Цемленко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф. СПбПУ

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

Aleksandrov M.L. — corresponding member of the Russian Academy of Sciences
Zgurovskiy M.Z. — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full
member of the National Academy of Sciences of Ukraine

Klimenko A.V. — full member of the Russian Academy of Sciences

Kostiuk V.V. — full member of the Russian Academy of Sciences

Lagar'kov A.N. — full member of the Russian Academy of Sciences

Okrepilov V.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

Rudskoy A.I. — full member of the Russian Academy of Sciences

Sarkisov A.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

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

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

Kondrat'ev S.Yu. — deputy editor-in-chief, Doctor of Technical Sciences,
prof. SPbPU

Aksenov L.B. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Bashkarev A.Ya. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Borovkov A.I. — PhD in Technical Sciences, Vice Rector for Digital Transformation

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

Zaboin B.N. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Kayaev I.A. — full member of the Russian Academy of Sciences

Kolcun Michal — Ph.D., Technical University of Kosice (Slovak Republic)

Kirillov A.I. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Korovkin N.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

Mityakov A.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

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. SPbPU, corresponding
member of the RAS

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. SPbPU

Tolochko O.V. — Doctor of Technical Sciences, prof. SPbPU

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

Tsamenko V.N. — Doctor of Technical Sciences, Head of Chair SPbPU

Журнал «Материаловедение. Энергетика» (ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки») 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.

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).

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.)

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

Тел. редакции (812) 294-22-86.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021

Содержание

Энергетика. Электротехника

Филин А.Г., Голубков В.Д., Шишкина И.А. Оптимизация расчетных алгоритмов определения теплового состояния активных частей турбогенератора.....	5
Бодренков Е.А., Коровкин Н.В., Селитреников Д.А. Идентификация состава многоэлементной нелинейной нагрузки по измерениям тока и напряжения на ее входе.....	19
Иванов И.О., Гливенко Д.Ю., Ходжамов А. Использование метода рандомизации в численном моделировании электрофизических процессов в металлопленочных конденсаторах.....	30
Маннанов Э.Р. О диэлектрических материалах с высокой теплопроводностью для систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин: обзор отечественной и зарубежной литературы.....	42
Сахно Л.И., Сахно О.И., Крылов М.С. Методика расчета и измерения активных мощностей и потерь в трансформаторах контактной стыковой сварки оплавлением труб.....	68
Кортиков Н.Н. Оптимизация системы охлаждения сопловой лопатки энергетической газовой турбины.....	85

Металлургия и материаловедение

Сурадж Б. Патил. Напряженное гофрирование прессованием алюминиевых сплавов – обзор.....	96
Вишняков П.С., Пэн Ш., Максимов М.Ю. Синтез и электрохимические характеристики нанопокровов твердого электролита литированного оксида тантала.....	106
Сутар Правин. Краткий обзор виброизоляции с использованием различных изоляционных материалов.....	117
Демидов А.И., Маркилов И.А. Термодинамика восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в присутствии углерода.....	124
Рогожкин В.В., Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Шеволдин А.В. Кулер против перегрева Австралии.....	132
Аль-Машхадани А.М., Першин В.Ф. Взаимосвязь между формой частиц исходного графита и графеновых пластин при жидкофазной эксфолиации.....	145

Некролог

Александр Иванович Кириллов.....	159
---	-----

Contents

Energetics. Electrical engineering

Filin A.G., Golubkov V.D., Shishkina I.A. Optimization of computational algorithms for determining the thermal state of turbine generators active parts.....	5
Bodrenkov E.A., Korovkin N.V., Selitrenikov D.A. Identification of the composition of multi-element non-linear load by measuring the current and voltage at its input.....	19
Ivanov I.O., Glivenko D.Y., Hojamov A. Randomization method application in numerical simulation of electrophysical processes in metallized film capacitors.....	30
Mannanov E.R. About dielectric materials with high thermal conductivity for electrical insulation systems of high-voltage electric machines: a review of domestic and foreign literature.....	42
Sakhno L., Sakhno O.I., Krylov M.S. Method for calculating and measuring active powers and losses in flash-butt welding transformers.....	68
Kortikov N.N. Optimization of the cooling system of the nozzle blade of an energy gas turbine.....	85

Metallurgy and Materials

Patil S. Constrained groove pressing of aluminium alloys – a review.....	96
Vishniakov P.S., Peng S., Maximov M.Yu. Synthesis and electrochemical characteristics of nanocoatings of lithiated tantalum oxide solid electrolyte.....	106
Sutar P. A short review of vibration isolation using various insulating materials.....	117
Demidov A.I., Markelov I.A. Thermodynamics of iron oxides reduction by carbon monoxide in the presence carbon.....	124
Rogozhkin V.V., Gorynin V.I., Kondatyev S.Yu., Mishin E.B., Kolenov E.V., Shevoldin A.V. Cooler against overheating of Australia.....	132
Al-Mashhadani A.M., Pershin V.F. Relationship between the shape of particles of initial graphite and graphene plates during liquid-phase shear exfoliation.....	145

Obituary

Alexander Ivanovich Kirillov	159
---	-----

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья
УДК 621.313.322-81
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27401>

А.Г. Филин¹ ✉, В.Д. Голубков², И.А. Шишкина³

¹ Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», Санкт-Петербург, Россия;

² Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт» (АО «Силовые машины»), Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

✉ a.g.filin@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ АКТИВНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Аннотация. В статье рассматриваются алгоритмы расчета теплового состояния активных частей турбогенераторов. Известны алгоритмы, основанные на применении вентиляционных схем замещения, которые не позволяют подробным образом рассмотреть характер течения охлаждающей среды, а формируют усредненные исходные данные для постановки задачи теплопередачи. Также применяются ресурсоемкие CFD-расчеты, в которых моделируется полный вентиляционный тракт турбогенератора. Предлагается имеющая прикладную направленность гибридная модель расчета, совмещающая преимущества описанных подходов, в которой при проведении многовариантных расчетов учтена обратная связь между изменением эквивалентного сопротивления участков вентиляционного тракта и расходом охлаждающей среды, протекающей через них. Такая модель позволяет повысить скорость получения и точность результатов. Предложенный подход верифицирован посредством сопоставительного анализа полученных результатов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: схема вентиляции, вычислительная газодинамика, теплопередача, турбогенератор, оптимизация.

Для цитирования:

Филин А.Г., Голубков В.Д., Шишкина И.А. Оптимизация расчетных алгоритмов определения теплового состояния активных частей турбогенератора // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 5–18. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27401>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

A.G. Filin¹ ✉, V.D. Golubkov², I.A. Shishkina³

¹ Joint Stock Company “Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomachexport”, St. Petersburg, Russia;

² Joint Stock Company “Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomachexport” (JSC “Power machines”), St. Petersburg, Russia;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ a.g.filin@gmail.com

OPTIMIZATION OF COMPUTATIONAL ALGORITHMS FOR DETERMINING THE THERMAL STATE OF TURBINE GENERATORS ACTIVE PARTS

Abstract. This paper studies computational algorithms for the thermal state of turbine generators active parts. There are well-known algorithms, based on ventilation substitution schemes, which do not allow considering the nature of the flow of the cooling medium in detail, but form averaged initial data for the formulation of the heat transfer problem. Resource-intensive CFD calculations are also used to simulate a full ventilation path. Here, an applied hybrid model is proposed, combining advantages of the described approaches and taking into account the return coupling between equivalent resistance change and mass flow of the ventilation path elements in multivariate simulations. This model allows us to increase the calculation speed and the results accuracy. The proposed approach is verified by comparing the simulated results with the experimental data.

Keywords: ventilation path, CFD, heat transfer, turbine generator, optimization.

Citation:

A.G. Filin, V.D. Golubkov, I.A. Shishkina, Optimization of computational algorithms for determining the thermal state of turbine generators active parts, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 5–18, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27401>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Турбогенераторы — мощные синхронные электрические неявнополюсные машины, предназначенные для выработки электрической энергии в составе оборудования тепловых и атомных электрических станций. При работе в обмотках, магнитопроводах и некоторых других конструктивных элементах турбогенераторов выделяются потери, которые следует отводить из активной зоны машины, в особенности, от обмоток, с целью установления уровня температур ниже температур, определяемых классом нагревостойкости электроизоляционных материалов. Этой цели служит система охлаждения, разработка и совершенствование которой является приоритетной задачей для мировых и отечественных производителей [1–11].

В настоящее время основные принципы конструирования турбогенераторов уже сложены, дальнейшее повышение максимальной и удельной мощности может быть достигнуто с помощью оптимизации их конструкции при выполнении тепловых расчетов. Основным инструментом для решения таких задач является математическое моделирование. Наиболее распространенным методом теплового расчета является расчет с помощью вентиляционных схем замещения [12]. Широко распространены тепловые расчеты, основанные на применении метода конечных объемов [13], реализованном в различных программных пакетах, например, ANSYS Fluent.

Задача моделирования турбулентного течения и теплообмена во всей вентиляционной системе турбогенератора, сопряженная с задачей теплопроводности, является ресурсоемкой. Для решения такой задачи единственным возможным является RANS-подход, в некоторых случаях дающий грубую оценку теплоотдачи с поверхности [14].

Например, в работе [15] приведен расчет системы воздушной вентиляции турбогенератора мощностью 350 МВт, выявлены недостатки конструкции, предложены усовершенствования с доказательством их эффективности с помощью расчета с модифицированной геометрией и проведения полноценного эксперимента. Для расчета течения использовалась модель турбулентности k - ϵ RNG, расчетная сетка составила 36 млн. полиэдральных ячеек. Также моделировался сопряженный теплообмен с зависимостью тепловыделения в проводниках от температуры. Столь масштабный расчет с экспериментальной валидацией и модификацией конструкции является скорее исключением, кроме того, такая тяжеловесная модель не применима для многошаговой/многокритериальной оптимизации.

В работе [16] приведен расчет системы вентиляции турбогенератора мощностью 40 МВт. Построена сетка из 11 млн. гексаэдральных ячеек. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса использовалась k - ω SST модель турбулентности. Тепловыделения в проводниках полагались постоянными, а граничные условия на входе задавались по результатам натурного эксперимента. Проводились расчеты для различных геометрий радиальных и подпазового каналов в роторе.

В качестве примера несвязанного, гидродинамического расчета всей системы вентиляции турбогенератора мощностью 60 МВт можно привести работу [17]. Авторы этой работы использовали k - ϵ RNG модель турбулентности, построив сетку в 13 млн. ячеек. Было проведено несколько расчетов с различными сечениями подпазового канала, проведено сравнение результатов с расчетами вентиляционной системы в гидравлическом приближении.

Таким образом, расчет всей системы вентиляции турбогенератора посредством численного моделирования движения охлаждающей среды и теплопередачи является достаточно трудоемким, использовать такие модели для проведения оптимизации невозможно. С другой стороны, оптимизация отдельных узлов вентиляционной системы может не привести к желаемому результату, поскольку изменение одной части конструкции приведет к изменению течения во всей системе. Учет этой обратной связи является необходимым условием проведения оптимизации конструкции турбогенератора. Целью данной работы является разработка гибридного подхода к расчету системы вентиляции, который может оказаться полезным и сбалансированным решением для оптимизации конструкции турбогенератора.

Гибридный метод расчета системы вентиляции

Основным методом расчета вентиляционной системы турбогенератора является метод, основанный на использовании схем замещения. Схемы замещения строятся по электротеплогидравлической аналогии, в которой каждый узел вентиляционной системы описывается гидравлическим сопротивлением, расходом и перепадом давления на узле.

Конечной целью расчета схемы вентиляции является определение расходов охлаждающей среды во всех ветвях и скоростей ее движения на участках ветвей. Полученные результаты являются исходными данными для теплового расчета, в том числе для сопряженного моделирования течения в отдельных элементах вентиляционной системы.

Пусть ξ – некоторый геометрический параметр с набором $\{\xi_i\}_{i=1,n}$, по которому требуется провести оптимизацию. При изменении этого параметра необходимо учитывать изменение сопротивления вентиляционного узла и соответствующее изменение расхода для задания правильных граничных условий в сопряженном расчете. Таким образом, следует на каждой итерации i перестраивать и пересчитывать схему замещения.

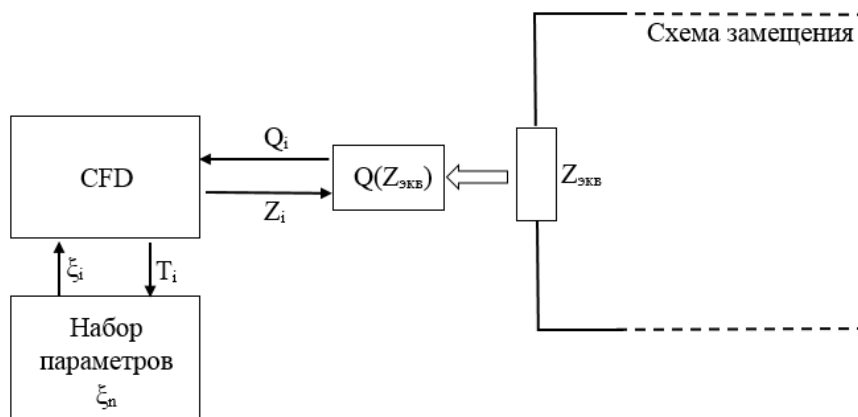


Рис. 1. Схема гибридного вентиляционного расчета
Fig. 1. Scheme of hybrid ventilation calculation



Рис. 2. Схема охлаждения сердечника и обмотки статора при помощи U образных каналов
Fig. 2. Ventilation path of the stator core and winding using U-shaped ducts

Во избежание многократного пересчета схемы вентиляции при оптимизации предлагается гибридный метод. Его суть заключается в замене сопротивления (или нескольких сопротивлений) вентиляционного узла, подлежащего оптимизации, эквивалентным сопротивлением $Z_{\text{экв}}$. По схеме замещения рассчитывается зависимость расхода через узел от эквивалентного сопротивления $Q(Z_{\text{экв}})$ (рис. 1). В таком случае оптимизационный алгоритм не затрагивает схему замещения, а обращается к сформированной зависимости $Q(Z_{\text{экв}})$.

Рассмотрим первую итерацию предложенного алгоритма (для базовой геометрии) на примере теплового расчета статора турбогенератора мощностью 130 МВт с воздушным охлаждением посредством U-образных каналов (рис. 2).

Конструкция является периодической в окружном направлении, а также в аксиальном (скошенные крайние пакеты не учитываются). В такой постановке задача сводится к расчету сопря-

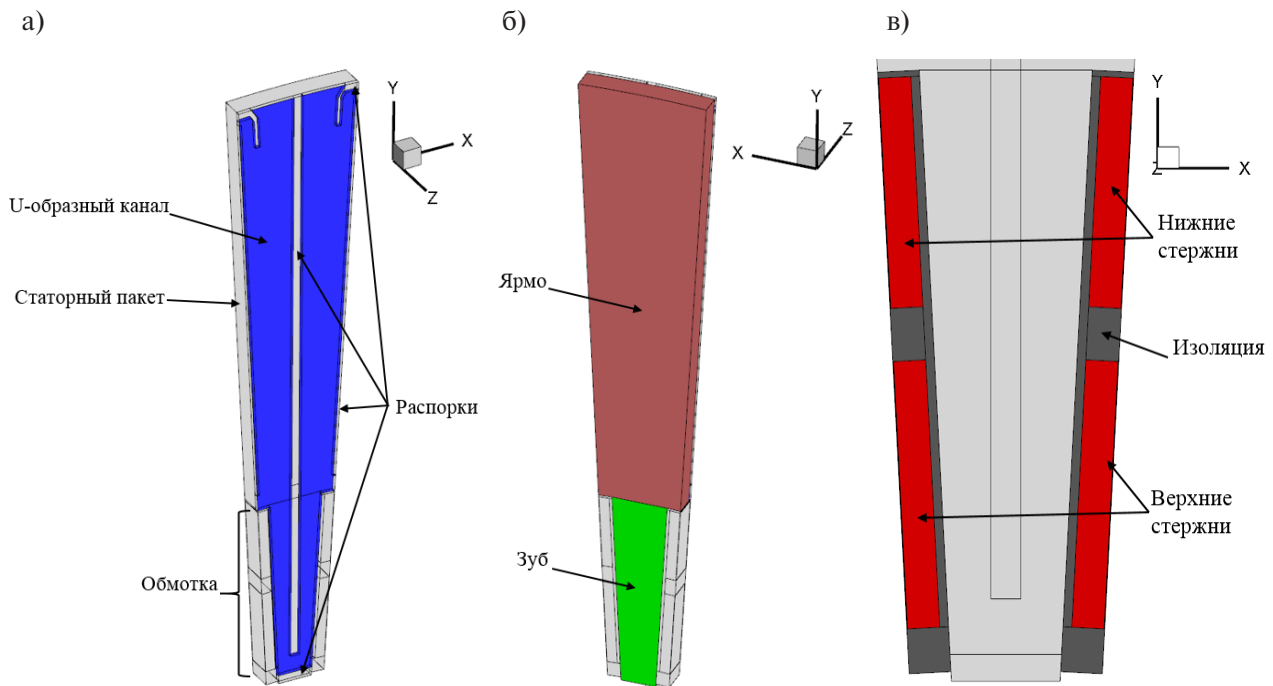


Рис. 3. Расчетная область
 Fig. 3. Computational domain

женного теплообмена для одного типичного элемента активной зоны статора, состоящего из одного вентиляционного U-образного канала и примыкающих к нему частей обмоток.

Расчетная область (рис. 3а) включает в себя U-образный канал, статорный пакет, разделенный на ярмо и зуб (рис. 3б), обмотки, состоящие из гомогенизированных стержней и изоляции (рис. 3в), а также распорки.

Воздух считается сжимаемым совершенным газом с постоянными вязкостью и теплопроводностью. Течение воздуха описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса, замкнутыми моделью турбулентности $k-\omega$ SST Ментера [18]. Теплопроводность стали ярма и зуба анизотропна и задается согласно результатам заводских исследований. Теплопроводность стержней обмотки также анизотропна, ее расчет произведен с учетом собственной изоляции медных проводников, из которых состоят стержни. Зависимость теплопроводности материалов от температуры не учитывается. В верхних, нижних стержнях, ярме и зубце задаются объемные тепловыделения согласно результатам электромагнитного расчета турбогенератора.

На входной границе (рис. 4а) задается среднерасходная скорость, соответствующая расходу в одном U-образном канале из вентиляционного расчета. Число Рейнольдса, построенное по входной скорости и высоте вентиляционного канала (в аксиальном направлении) равно 4500. На выходной границе (рис. 4а) задается постоянное давление. На стенках канала задаются условия прилипания и сопряженного теплообмена.

Со стороны воздушного зазора на поверхностях изоляции, зуба и распорки (рис. 4б) задается условие конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи, посчитанным по канонической формуле:

$$\alpha = 0.023 \frac{\lambda}{d} \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4}, \quad (1)$$

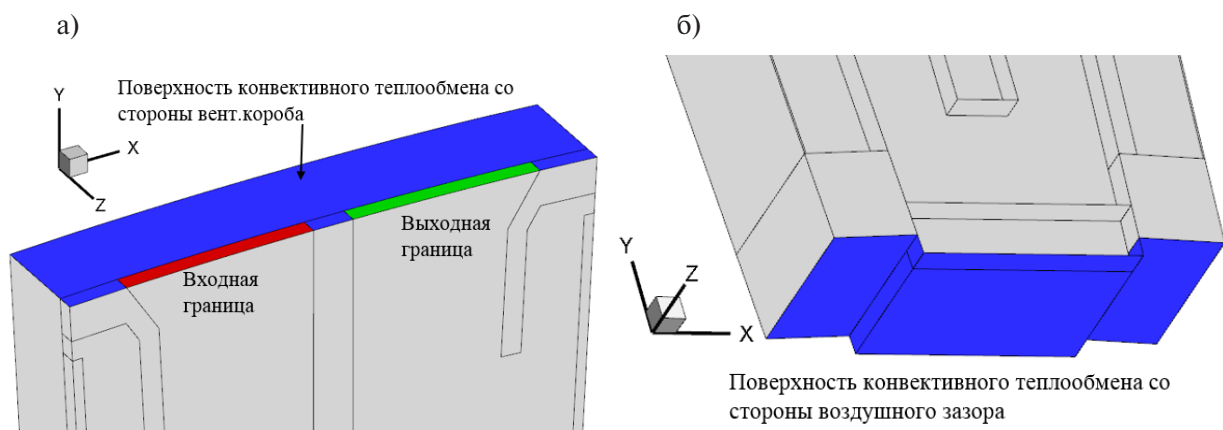


Рис. 4. Граничные условия со стороны вентиляционного короба (а) и воздушного зазора (б)

Fig. 4. Boundary conditions from ventilation duct and air gap side

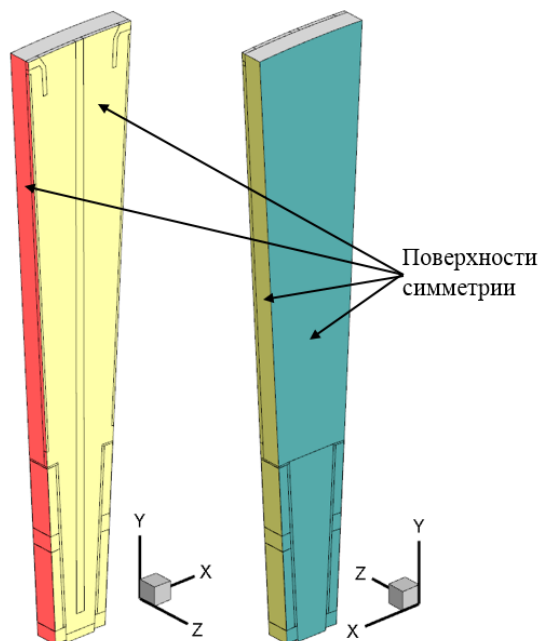


Рис. 5. Границы условий симметрии

Fig. 5. Symmetry boundary conditions

где d – величина зазора, Re – число Рейнольдса, посчитанное по окружной скорости движения в зазоре. Прирост температуры газа в зазоре оценен по общей мощности тепловыделения в роторе и расходу через ротор:

$$\Delta T = \frac{P}{c_p Q}, \quad (2)$$

где P – мощность тепловыделения в роторе, c_p – изобарная теплоемкость воздуха, Q – массовый расход через ротор.

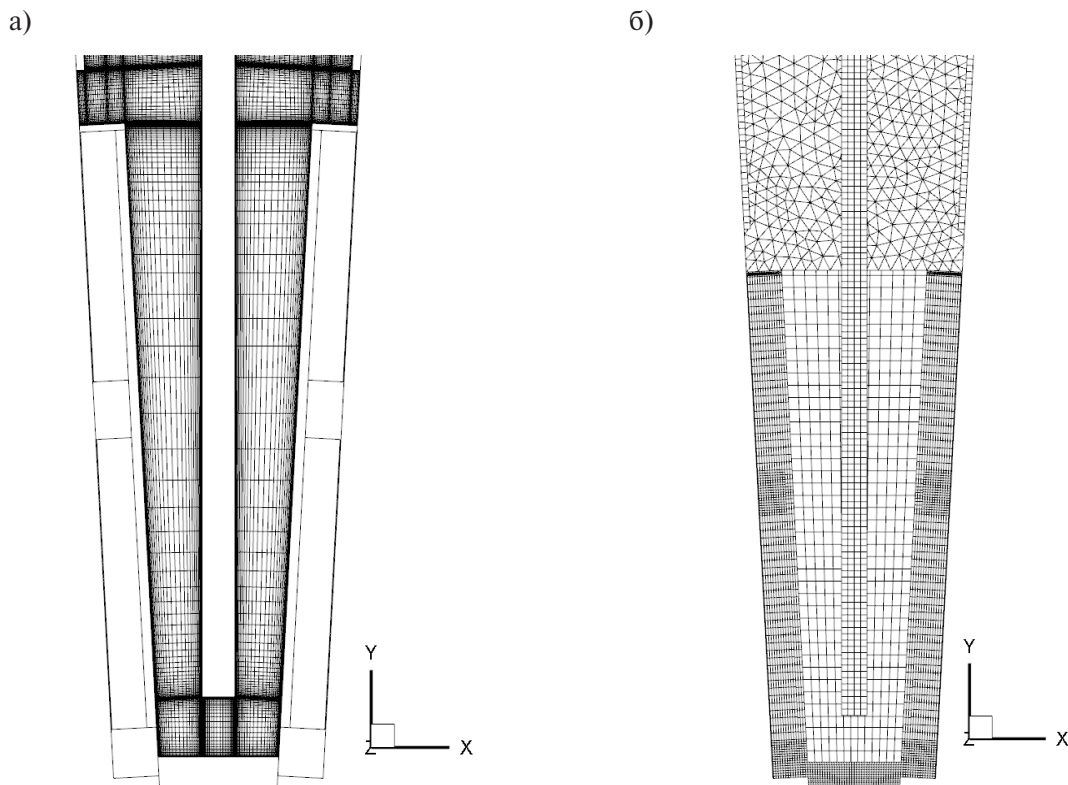


Рис. 6. Базовая расчетная сетка для газа (а) и твердых тел (б)
 Fig. 6. Base computational grid for gas (a) and solid bodies (b)

Со стороны вентиляционного короба (рис. 4б) задается условие конвективного теплообмена с коэффициентом теплоотдачи и температурой потока, определенными аналогично. На остальных внешних поверхностях задается условие симметрии (рис. 5).

Расчетная сетка для газа является многоблочной, структурированной, со сгущением к стенкам равным 1.2. Расчетная сетка для ярма состоит из тетраэдров, для остальных твердых тел построена структурированная расчетная сетка. Общий размер базовой расчетной сетки (рис. 6) составил 500 тыс. ячеек. Кроме базовой была построена измельченная сетка с увеличением количества узлов на всех гранях примерно в 1.5 раза. Общий размер измельченной сетки составил 1.8 млн. ячеек. Базовая расчетная сетка обеспечивает y_1^+ в диапазоне от 0.5 до 25, а измельченная – от 0.1 до 5 на поверхности стенок канала, не занятых отрывами.

Для моделирования сопряженного теплообмена использовался вычислительный пакет ANSYS Fluent 19R1. Для решений уравнений движения использовался сопряженный метод coupled. Уравнения движения, неразрывности и энергии дискретизировались по противопоточной схеме второго порядка. Для интерполяции давления на грань использовалась центрально-разностная схема второго порядка. Интерполяция кинетической энергии турбулентности и удельной диссипации производилась по противопоточной схеме первого порядка. Уравнения решались с числом Куранта $CFL = 20$ и коэффициентами релаксации для импульса и давления равными 0.3.

Полученные результаты и их верификация

Средние температуры обмоток и активной стали статора отличаются на базовой и измельченной сетке не более, чем на 2% (см. табл. 1, стержни пронумерованы вдоль по каналу). Будем считать, что на базовой сетке достигнуто сеточно независимое решение.

Таблица 1

Результаты исследований на сеточную независимость

Table 1

Investigation results of grid independence

	Ярмо	Зуб	Нижний стержень-1	Верхний стержень-1	Верхний стержень-2	Нижний стержень-2
Базовая сетка, средняя температура $\langle T \rangle$, °C	64.58	90.6	108.53	126.64	125.89	111.05
Измельченная сетка, средняя температура $\langle T \rangle$, °C	64.6	89.86	107.72	125.72	124.11	110.34
Δ , %	< 0.1	0.8	0.8	0.7	1.4	0.6

Течение в U-образном канале статора сопровождается множественными отрывами потока: от L-образных распорок в верхней части пакета (рис. 7а), при входе в пазовую часть и после выхода из нее (рис. 7б), на центральной распорке на повороте и в углах канала в нижней части (рис. 7в). Отрыв за L-образной распоркой у выхода из канала доходит до выходной границы, но не влияет на интересующие области течения в пазу и большей части ярма.

Поток нагревается вдоль по каналу, собирая тепловыделения активных частей и обмотки. При этом в рециркуляционных зонах поток нагревается сильнее, чем в близлежащих областях (рис. 8а). На повороте скорость потока значительно возрастает, после выхода из пазовой части поток прижимается к внешней стенке канала (рис. 8б).

Коэффициент теплоотдачи на стенках канала (рис. 8в) посчитан по формуле:

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_{in}}, \quad (3)$$

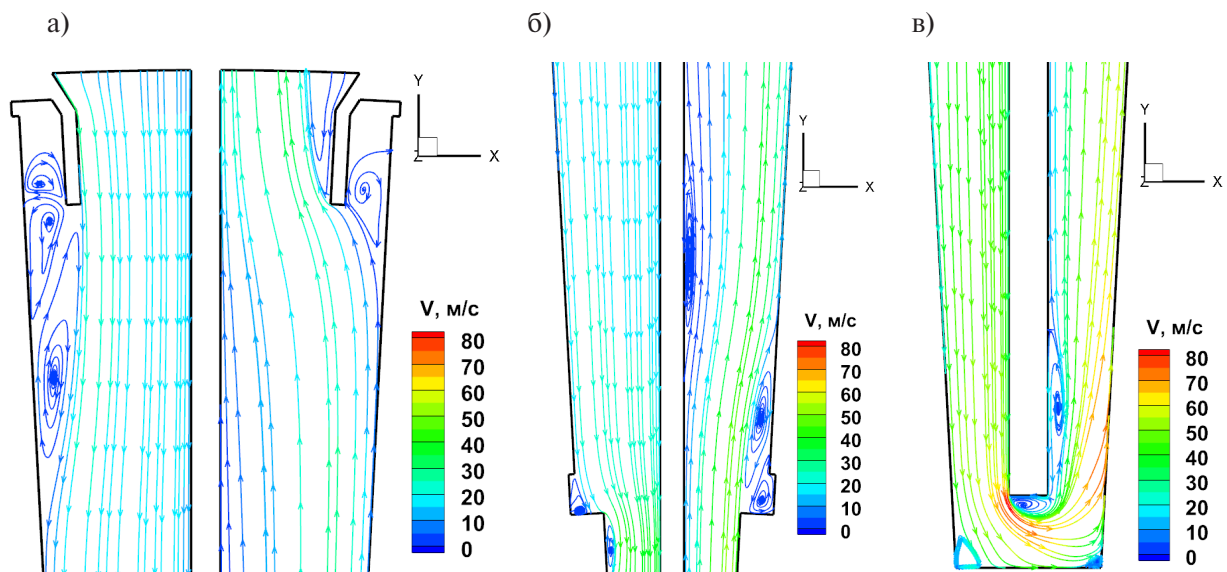


Рис. 7. Линии тока в U-образном канале статора

Fig. 7. Streamlines in stator U-ducts

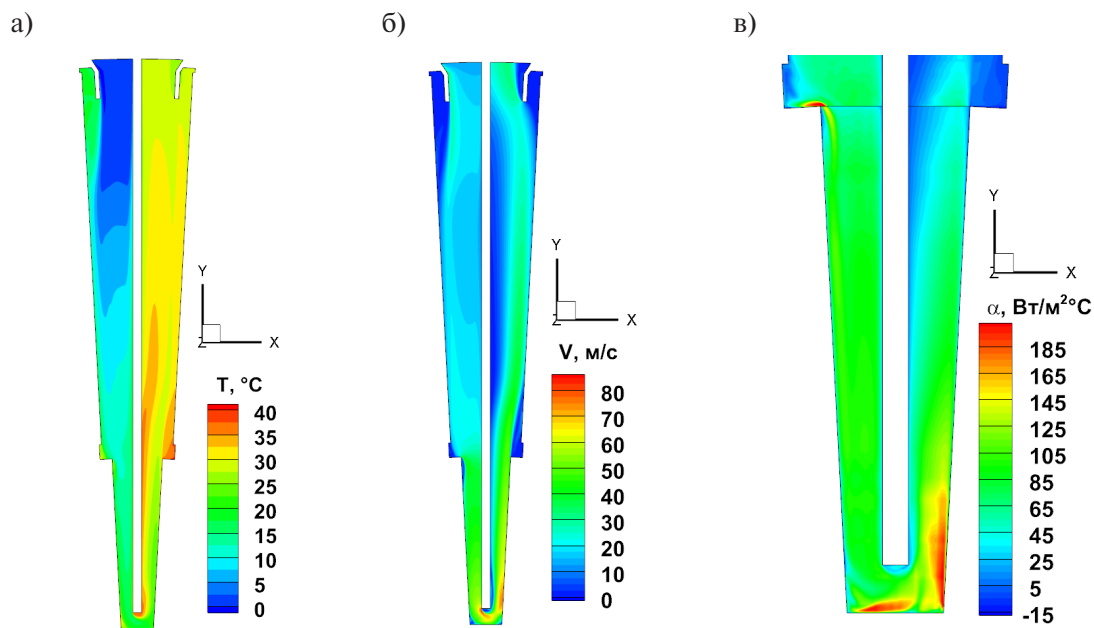


Рис. 8. Поля температуры, модуля скорости в плоскости симметрии и коэффициента теплоотдачи на стенках
 Fig. 8. Temperature, velocity magnitude fields in symmetry plane and heat transfer coefficient on walls

где q_w — тепловой поток через стенку, T_w — температура стенки, T_{in} — температура газа на входе в канал. В пазовой зоне коэффициент теплоотдачи значительно повышается у внешних стенок на повороте, где поток разгоняется, и уменьшается в отрывных зонах. Кроме того, в отрывных зонах на поверхности ярма после поворота поток не снимает тепло, а наоборот, нагревает сталь, поэтому коэффициент теплоотдачи становится отрицательным.

Температурное поле обмотки в плоскости симметрии канала представлено на рис. 9а. Верхние стержни нагреты сильнее нижних, так как тепловыделение в них больше. При этом верхний стержень до поворота нагрет сильнее, чем верхний стержень после поворота. Причиной этого является разгон потока на повороте и увеличение коэффициента теплоотдачи со стенок канала, примыкающих к этому стержню. Нижний стержень после поворота нагрет сильнее, чем нижний стержень до поворота, так как скорости потока, охлаждающего обмотку в этих местах, практически не отличается, но стержень после поворота охлаждает более нагретый газ. Тепловое состояние обмотки не изменяется в аксиальном направлении (рис. 9б).

Из-за охлаждения потоками с разной температурой тепловое состояние ярма и зубца несимметрично относительно радиальной плоскости симметрии, которая на рис. 9в параллельна плоскости Y-Z. Это приводит к образованию теплового потока в окружном направлении. Выделяемые потери снимаются воздухом неравномерно, часть канала до поворота снимает большую часть потерь, чем часть канала после поворота. Этот тепловой поток через ярмо увеличивает температуру охлаждающего воздуха, и, следовательно, обмотки статора.

Валидация методики моделирования проведена посредством сравнения результатов расчета с натурными испытаниями турбогенератора мощностью 130 МВт с воздушным охлаждением. Мониторинг теплового состояния обмотки статора осуществлялся с помощью термометра штатного термоконтроля, установленного между стержнями. В табл. 2 приведены данные расчета и эксперимента для превышения температуры над температурой холодного воздуха (40°C).

Дальнейший процесс оптимизации предполагает обращение к полученной с помощью схемы замещения зависимости расхода от эквивалентного сопротивления U-образных каналов. При

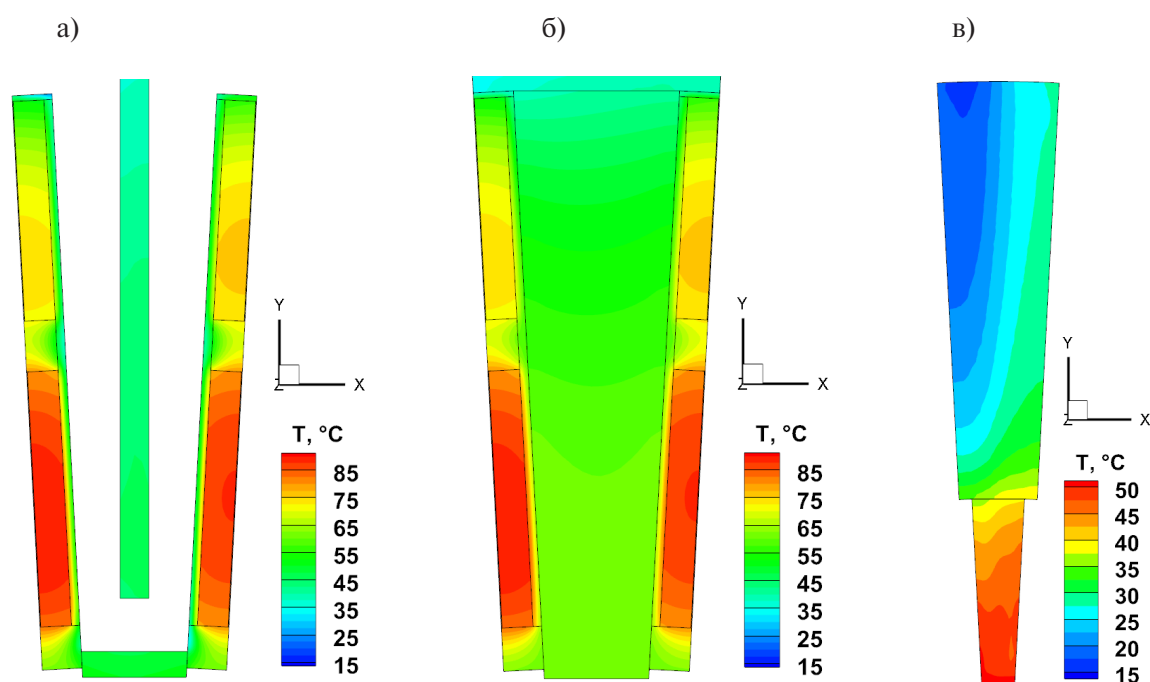


Рис. 9. Превышение температуры обмотки и активных частей статора над температурой холодного воздуха (40°C)

Fig. 9. Windings and active parts temperature rise above cold air temperature (40°C)

изменении параметра ξ по новому гидравлическому сопротивлению канала определяется расход через него.

Валидация результатов расчетов

Таблица 2

Validation of calculation results

Table 2

	Превышение температуры в зоне установки датчика, °C
Расчет	79
Испытания	73
Δ , %	8,2

Обсуждение полученных результатов

Данные табл. 2 показывают, что численное моделирование предсказывает повышенную температуру по сравнению с результатом натурального испытания. Одну из причин расхождения можно связать с использованием RANS-модели турбулентности. Известно, что эти модели турбулентности не очень точны при расчете отрывных течений, в частности, $k-\omega$ SST модель Ментера зачастую дает отличающиеся от действительного значения протяженности зон отрыва [19]. Моделируемое течение в U-образном канале сопровождается большим количеством отрывов за распорками, в углах паза и за поворотом. В зонах рециркуляции интенсивность отвода тепла от поверхности уменьшается, при этом температура активных частей повышается.

Результат моделирования дает консервативную оценку для температуры и тем самым создает расчётный температурный запас конструкции. Полученный в расчете тепловой запас конструкции, согласно накопленному опыту проектирования и эксплуатации, необходим для учета влия-

ния технологии производства и сборки турбогенераторов. При этом стоит избегать чрезмерного инженерного запаса по газодинамическому сопротивлению рассматриваемой системы каналов, поскольку итоговое увеличение расхода приведет к росту потерь на вентиляцию и снижению коэффициента полезного действия турбогенератора.

Заключение

В работе предложена гибридная методика расчета теплового состояния активных частей турбогенератора, заключающаяся в объединении преимуществ вентиляционных схем замещения (скорость расчета, низкие требования к ресурсам, универсальность) и численного моделирования движения жидкости (повышенная детализация, возможность анализа характера течения потока в разветвленной системе каналов, возможности газодинамической оптимизации узлов и элементов вентиляционного тракта).

Описанный гибридный подход валидирован на примере расчета теплового состояния статора испытанного в натурных условиях мощного турбогенератора. Полученную разницу в виде увеличения расчетной температуры обмотки статора в зоне измерений на 8% по сравнению с измеренной можно считать допустимой.

Усовершенствованные расчетные алгоритмы предоставляют новые возможности совершенствования схем вентиляции турбогенераторов посредством проведения многовариантных расчетов с оптимизацией по критерию теплового состояния их активных частей. Результаты можно распространить на другие типы электрических машин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Priano M., Tartaglione V.** A new 400 MVA air cooled turbogenerator from Ansaldo Energia // Power-Gen Europe, Milan, 2016.
- [2] **Baron D., Maniara R., Adamek J.** Modernizations of turbogenerators on the example of TWW-series turbogenerators // Power-Gen Europe, Milan, 2016.
- [3] **Han J., Ge D., Tao D., Li W.** Influence of Cooling Fluid Parameter on the Fluid Flow and End Part Temperature in End Region of a Large Turbogenerator // IEEE Trans. Energy Conversion. 31 (2) (2016) 466–476.
- [4] **Минко А.Н.** Графическая модель проектирования эффективной системы охлаждения крупных электрических машин (турбогенераторов) // Электроэнергетика глазами молодежи: Материалы 7 Международной молодежной научно-технической конференции, Казань, 2016.
- [5] **Han J., Li W., Li Y.** Analysis of three-dimensional complex fluid flow and temperature distribution in the end region of a turbogenerator // IEEE Trans. Ind. Electronics. 62 (9) (2015) 5370–5381.
- [6] **Hu L., Yuan Y., Li L., Xian Z., Liang X.** Air flow characteristics in stator core of 300 MW double water inner cooled turbo generator // Shanghai Ligong Daxue Xuebao. 36 (5) (2014) 456–460.
- [7] **Lu Y., Pan Q., Sun X., Han J.** Effect of turbulence models on temperature and flow field for turbogenerator rotor // Dianji Yu Kongzhi Xuebao. 18 (11) (2014) 72–77.
- [8] **Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г.** Повышение интенсивности охлаждения роторов турбогенераторов с газовым охлаждением // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие топливно-энергетической и добывающей отрасли 2021. (2021) 189–193.
- [9] **Korovkin N., Verkhovtsev D., Gulay S.** Rotor Air-Cooling Efficiency of Powerful Turbogenerator // IEEE Trans. on Energy Conversion (Early Access). (2020).
- [10] **Афанасов П.А., Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г.** Ротор электрической машины // Пат. 2 691 644 Российская Федерация, МПК H02K 1/32.; заявитель и патентообладатель ПАО Силовые машины. № 2018139086; заявл. 06.11.2018; опубл. 17.06.2019, Бюл. № 17. 24 с.: 8 ил.

- [11] **Минко А.Н.** Комплексный подход проектирования систем охлаждения крупных электрических машин (турбогенераторов) // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 1 (2017) 12–18.
- [12] **Филин А.Г., Каргашова Т.Н.** Расчёт распределения воздушных потоков в турбогенераторе мощностью 320 МВт с комбинированной системой охлаждения // XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч II. 2007. С. 45–46.
- [13] **Chung T.J.** Computational Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 2002.
- [14] **Gourdain N., Gicquel L.Y.M., Morata E.C.** Comparison of RANS simulation and LES for the prediction of heat transfer in a highly loaded turbine guide vane // Journal of Propulsion and Power. 2 (2) (2011) 847–862.
- [15] **Zhou G., Han L., Fan Z., Zhang H., Dong X. et al.** Ventilation Cooling Design for a Novel 350-MW Air-Cooled Turbo Generator // IEEE Access. (6) (2018) 62184–62192.
- [16] **Franc J., Pechanek R., Kindl V. et al.** Ventilation system with skewed rotor cooling ducts of 40-MW synchronous machine: a case study // Electrical Engineering. (101) (2019) 203–211.
- [17] **Franc J., Pechanek R., Kindl V.** Optimization of ventilation system of the air-cooled turbo generator // 17th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME), Prague, 2016.
- [18] **Menter F.R., Kuntz M., Langtry R.** Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer. (4) (2003) 625–632.
- [19] **Buice C., Eaton J.** Experimental Investigation of Flow Through an Asymmetric Plane Diffuser // Report No. TSD-107, Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford, 1997.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФИЛИН Алексей Григорьевич – руководитель группы, Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт», канд. техн. наук.
E-mail: a.g.filin@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9516-9970>

ГОЛУБКОВ Валентин Денисович – инженер-конструктор, Акционерное общество «Силовые машины – ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт» (АО «Силовые машины»), без степени.
E-mail: golubkovvd@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9473-7430>

ШИШКИНА Ирина Александровна – студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: irina-shishkina-1998@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1094-8386>

REFERENCES

- [1] **M. Priano, V. Tartaglione**, A new 400 MVA air cooled turbogenerator from Ansaldo Energia // Power-Gen Europe, Milan, 2016.
- [2] **D. Baron, R. Maniara, J. Adamek**, Modernizations of turbogenerators on the example of TWW-series turbogenerators // Power-Gen Europe, Milan, 2016.
- [3] **J. Han, B. Ge, D. Tao, W. Li**, Influence of Cooling Fluid Parameter on the Fluid Flow and End Part Temperature in End Region of a Large Turbogenerator // IEEE Trans. Energy Conversion. 31(2) (2016) 466–476.

- [4] **A.H. Minko**, Graphicheskaya model' proektirovaniya effektivnoi sistemy ohlazhdeniya krupnykh elektricheskikh mashchin [Graphical model of effective system design for large electrical machines (turbine generators) cooling] // Power industry by the eyes of youth: 7th International young research and technology conference materials, Kazan', 2016.
- [5] **J. Han, W. Li, Y. Li**, Analysis of three-dimensional complex fluid flow and temperature distribution in the end region of a turbogenerator // IEEE Trans. Ind. Electronics. 62 (9) (2015) 5370–5381.
- [6] **L. Hu, Y. Yuan, L. Li, Z. Xian, X. Liang**, Air flow characteristics in stator core of 300 MW double water inner cooled turbo generator // Shanghai Ligong Daxue Xuebao. 36 (5) (2014) 456–460.
- [7] **Y. Lu, Q. Pan, X. Sun, J. Han**, Effect of turbulence models on temperature and flow field for turbo-generator rotor // Dianji Yu Kongzhi Xuebao. 18 (11) (2014) 72–77.
- [8] **T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofyev, A.G. Filin**, Povysheniye intensivnosti okhlazhdeniya rotorov turbogeneratorov s gazovym okhlazhdeniyem [Increasing the cooling rate of gas-cooled turbogenerator rotors] // Sbornik rabot laureatov mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tehnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye toplivno-energeticheskoy i dobyvayushchey otrasli 2021. (2021) 189–193.
- [9] **N. Korovkin, D. Verkhovtsev, S. Gulay**, Rotor Air-Cooling Efficiency of Powerful Turbogenerator // IEEE Trans. on Energy Conversion (Early Access). (2020).
- [10] **P.A. Afanasov, T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofyev, A.G. Filin**, Rotor elektricheskoy mashiny [Rotor of electrical machine] // Pat. 2 691 644 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H02K 1/32.; zayavitel i patentoobladatel PAO Silovyye mashiny. № 2018139086; zayavl. 06.11.2018; opubl. 17.06.2019, Byul. № 17. 24 s.: 8 il.
- [11] **A.N. Minko**, Kompleksnyy podkhod proyektirovaniya sistem okhlazhdeniya krupnykh elektricheskikh mashin (turbogeneratorov) [A comprehensive approach to the design of cooling systems for large electric machines (turbine generators)] // Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont. 1 (2017) 12–18.
- [12] **A.G. Filin, T.N. Kartashova**, Rashchet raspredeleniya vozdukhnykh potokov v turbogeneratore moshchnosti 320 MW s kombinirovannoi sistemoi ohlazhdeniya [Calculation of air fluxes distribution in turbine generator of 320 MW power with combined cooling system] // XXXV SPbGPU Science week: Russian Interuniversity research and technology conference of students and post-graduate materials. (2) (2007) 45–46.
- [13] **T.J. Chung**, Computational Fluid Dynamics, Cambridge University Press, 2002.
- [14] **N. Gourdain, L.Y.M. Gicquel, E.C. Morata**, Comparison of RANS simulation and LES for the prediction of heat transfer in a highly loaded turbine guide vane // Journal of Propulsion and Power. 2 (2) (2011) 847–862.
- [15] **G. Zhou, L. Han, Z. Fan, H. Zhang, X. Dong et al.**, Ventilation Cooling Design for a Novel 350-MW Air-Cooled Turbo Generator // IEEE Access. (6) (2018) 62184–62192.
- [16] **J. Franc, R. Pechanek, V. Kindl et al.**, Ventilation system with skewed rotor cooling ducts of 40-MW synchronous machine: a case study // Electrical Engineering. (101) (2019) 203–211.
- [17] **J. Franc, R. Pechanek, V. Kindl**, Optimization of ventilation system of the air-cooled turbo generator // 17th International Conference on Mechatronics – Mechatronika (ME), Prague, 2016.
- [18] **F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry**, Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer. (4) (2003) 625–632.
- [19] **C. Buice, J. Eaton**, Experimental Investigation of Flow Through an Asymmetric Plane Diffuser // Report No. TSD-107, Thermosciences Division, Department of Mechanical Engineering, Stanford, 1997.

THE AUTHORS

FILIN Aleksei G. — Joint Stock Company “Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomach-export”.

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

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

GOLUBKOV Valentin D. — *Joint Stock Company “Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomachexport” (JSC “Power machines”).*

E-mail: golubkovvd@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9473-7430>

SHISHKINA Irina A. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: irina-shishkina-1998@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1094-8386>

Статья поступила в редакцию 31.05.2021; одобрена после рецензирования 26.08.2021; принята к публикации 31.08.2021.

The article was submitted 31.05.2021; approved after reviewing 26.08.2021; accepted for publication 31.08.2021.

Научная статья

УДК 537.311.6

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27402>

Е.А. Бодренков¹ ✉, Н.В. Коровкин¹, Д.А. Селитреников²

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

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ evgenii.bodrenkov@gmail.com

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТАВА МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ЕЕ ВХОДЕ

Аннотация. Приведена методика идентификации состава многокомпонентной нелинейной нагрузки с целью выявления в нагрузке типовых нелинейных элементов. Предложенный подход позволяет отделять линейную составляющую нагрузки от нелинейной и определять в нагрузке число нелинейных элементов каждого типа, при условии, что типы нелинейных нагрузок известны заранее. Полученная информация может использоваться при решении споров о причинении вреда оборудованию поставщика электроэнергии или потребителя при нарушении качества электроэнергии в сети. Идентификация проводится по измерениям на входе нагрузки, поэтому подход может быть использован для контроля нагрузки потребителя без вмешательства в его электрическую сеть. Исходными данными для идентификации являются гармонический состав входного тока нагрузки и характеристики нелинейных элементов. Идентификация осуществляется с использованием разложения гармонического состава входного тока по базису, состоящему из векторов входного тока различных типов нелинейной нагрузки. Приведена оценка погрешности метода при неточном измерении входного тока, а также при наличии в нагрузке нелинейных элементов с близкими вольтамперными характеристиками. Намечены возможности повышения селективности метода.

Ключевые слова: качество электроэнергии, нелинейная нагрузка, преобразование Фурье, спектральный анализ, гармоника, метод наименьших квадратов, электроэнергетика, ответственность.

Для цитирования:

Бодренков Е.А., Коровкин Н.В., Селитреников Д.А. Идентификация состава многоэлементной нелинейной нагрузки по измерениям тока и напряжения на ее входе // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27402>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E.A. Bodrenkov¹ ✉, N.V. Korovkin¹, D.A. Selitrenikov²

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

² St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russia

✉ evgenii.bodrenkov@gmail.com

IDENTIFICATION OF THE COMPOSITION OF MULTI-ELEMENT NON-LINEAR LOAD BY MEASURING THE CURRENT AND VOLTAGE AT ITS INPUT

Abstract. The paper presents an approach for identifying the composition of a multicomponent non-linear load with the aim of identifying its typical nonlinear elements. The proposed approach allows us to separate the linear component of the load from the nonlinear and determine the number of the non-linear elements of each type in the load given their types are known beforehand. The information obtained can be used in resolving disputes about damage caused to the equipment of the electricity supplier or the consumer in case of inappropriate power quality. The approach can be used to control the load of the consumer without interfering with their electrical facilities. Identification is based on measurements at the input of the load. The initial data are the harmonic composition of the input load current and information about the typical elements. The solution includes decomposing the harmonic composition of the input current based on the input current vectors of different types of nonlinear loads. We also estimated the method error for inaccurate measurement of the input current, as well as for the use of nonlinear elements with close current-voltage characteristics. We intend to find the possibilities of increasing the accuracy of the method.

Keywords: power quality, non-linear load, Fourier transform, spectral selectivity, harmonica, least-squares deviation method, electric-power engineering, liability.

Citation:

E.A. Bodrenkov, N.V. Korovkin, D.A. Selitrenikov, Identification of the composition of multi-element non-linear load by measuring the current and voltage at its input, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 19–29, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27402>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Одной из важных задач современной энергетики является повышение качества поставляемой электроэнергии (ЭЭ). Высшие гармоники тока и напряжения в сети могут представлять опасность для оборудования электроэнергетических сетей (ЭЭС), снижают эффективность его работы и срок безаварийной эксплуатации [1–4]. В большом числе случаев высшие гармоники тока и напряжения сети порождаются электроприёмниками с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ). Поэтому обнаружение таких приёмников и контроль уровня порождаемых ими помех имеет большое значение [5–7].

Ответственность за качество ЭЭ во многом ложится на поставщика. Современное российское законодательство не предусматривает непосредственной ответственности потребителя за качество электроэнергии в сети [8–11]. Поэтому в случае ухудшения качества поставляемой электроэнергии по вине потребителя, в частности, при порче оборудования другого потребителя, снабжающая организация может требовать возмещение ущерба, причиненного электрооборудованием абонента, только доказав вину последнего, что на практике вызывает большие трудности [12–16].

Предлагаемый в данной статье подход позволяет идентифицировать состав многоэлементной нагрузки. По измерениям в одном узле метод позволяет фиксировать подключение (отключение)

конкретных устройств в составе нагрузки, либо существенное изменение режима их работы без установки датчиков у каждого устройства.

Вариант решения данной задачи рассмотрен в [17]. В этой статье, являющейся основополагающей для нашего исследования, было предложено использовать дискретное преобразование Фурье для определения электроприёмников в составе нагрузки методом наложения. Нами предложен иной вариант декомпозиции входного тока, имеющий, по нашему мнению, ряд существенных преимуществ, где вместо метода перебора предполагается решать задачу методом наименьших квадратов.

Область применения и основные допущения

Предлагаемый в статье метод позволяет обнаруживать в составе нагрузки нелинейные устройства и определять их количество. Это может найти применение при разрешении споров, связанных с поставкой некачественной электроэнергии. Данный подход позволит зафиксировать факт применения потребителем устройств, снижающих качество электроэнергии в сети.

Подход может найти применение на автономных производственных линиях, где позволит оперативно обнаружить сбой на каком-либо участке. Также он может применяться для контроля работы оборудования в агрессивной среде, где установка датчиков непосредственно на оборудование может быть сложна либо затратна.

Будем исходить из достаточно общих и реализующихся, обычно, на практике предположений. Рассматривается сеть переменного тока (50 Гц). Сеть, от которой питается нагрузка, достаточно мощная и напряжение U на зажимах нагрузки можно считать синусоидальным, несмотря на то, что нагрузка нелинейна. Нагрузка состоит из несколько параллельно соединенных устройств как нелинейных, так и линейных, соединенных между собой проводниками с малым в сравнении с сопротивлением нагрузок сопротивлением. ВАХ всех нелинейных устройств, которые могут входить в нагрузку, предполагаются известными. Все измерения проводятся только в одном из узлов нагрузки. Далее мы будем предполагать для определенности, что это узел присоединения нагрузки к питающей сети, хотя это и не является обязательным.

Метод идентификации состава нагрузки

В соответствии со сделанными выше допущениями, потребитель ЭЭ (нагрузка), имеет некоторое количество устройств (электроприемников) разных типов. Все электроприемники подключены параллельно, сопротивление проводов не учитывается. В состав нагрузки входят как линейные устройства, схемы замещения которых содержат R , L , C элементы, так и пассивные (по отношению к питающей сети) нелинейные устройства: выпрямители, регуляторы напряжения, источники питания электронной аппаратуры и т.п. Количество n типов электроприёмников и их ВАХ известны заранее, но, при этом не предполагается, что в нагрузке одновременно присутствуют все типы устройств, однако возможно наличие нескольких устройств любого из типов. Предполагается также, что ВАХ всех устройств получены при синусоидальном напряжении с действующим значением U , равным напряжению питающей сети.

Задача стоит в определении состава нелинейной части нагрузки или, что то же самое, определения количеств подключенных нелинейных устройств каждого типа, а также определения эквивалентных параметров линейной части нагрузки. При этом, исходными данными являются входное напряжение и ток нагрузки.

Метод решения

В силу того, что сеть, от которой питается нагрузка, достаточно мощная, напряжение U на зажимах нагрузки можно считать синусоидальным. В соответствии сделанными выше допущениями, для электроприёмников, которые могут присутствовать в нагрузке, известны ВАХ. Зная ВАХ k -го электроприемника, можно расчетным путем или экспериментально определить постоянную

составляющую $I_{k,0}$ и комплексные амплитуды $\dot{I}_{k,q} q = \overline{1, m}$ гармоник тока устройства возникающих при его подключении к синусоидальному напряжению U [18]. Далее в качестве характеристики k -го устройства будем использовать вектор $\mathbf{I}_k = [I_{k,0}, \dot{I}_{k,1}, \dot{I}_{k,2}, \dots, \dot{I}_{k,m}]^T$.

Вектор тока, характеризующий s одинаковых параллельно включенных устройств, будет иметь вид $s\mathbf{I}_k$. Будем обозначать величины, относящиеся к линейной части нагрузки индексом L . Очевидно, что в векторе $\mathbf{I}_L$, составленном для любой линейной нагрузки $R + jX$, будет отличен от нуля только член, отвечающий за первую гармонику тока.

Пусть теперь нагрузка содержит неизвестное нам количество устройств, каждое из которых относится к одному из n заранее предопределенных типов *Type 1*...*Type n*, а также некоторую линейную составляющую, которую можно представить в виде комплексного сопротивления $R + jX$. (рис. 1). При напряжении U измерим постоянную составляющую и комплексные амплитуды входного тока $\mathbf{J}_S = [J_{S,0}, \dot{J}_{S,1}, \dots, \dot{J}_{S,m}]^T$, $m \geq n$.

Составим систему уравнений вида:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & I_{0,1} & I_{0,2} & \dots & I_{0,n} \\ \dot{I}_{L,1} & \dot{I}_{1,1} & \dot{I}_{1,2} & \dots & \dot{I}_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dot{I}_{m,1} & \dot{I}_{m,2} & \dots & \dot{I}_{m,n} \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} S_L \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} = \underbrace{\begin{bmatrix} J_{S,0} \\ \dot{J}_{S,1} \\ \vdots \\ \dot{J}_{S,m} \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}_S}. \quad (1)$$

Решая (1), определим вектор $\mathbf{S}$, k -ый элемент которого даст количество электроприёмников k типа в составе нагрузки, что и является решением поставленной выше задачи. Что касается линейной части нагрузки, то для определения её параметров необходимо базисное значение $R + jX$, использованное при составлении первого столбца в матрице $\mathbf{I}$, разделить на S_L . Стоит упомянуть, что если член S_L имеет мнимую часть, это означает, что линейная часть нагрузки имеет угол φ отличный от данного параметра у элемента, принятого в качестве базисного. В общем случае R и X базисного элемента могут быть выбраны любыми, но, по мнению авторов, наиболее удобно использовать для этого активное сопротивление примерно такой же мощности, как базисные нелинейные элементы.

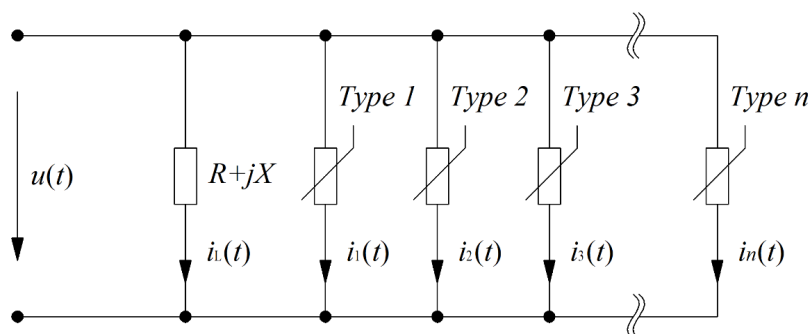


Рис. 1. Нагрузка, включающая эквивалентный линейный электроприемник – $R + jX$ и n нелинейных электроприемников различных типов

Fig. 1. Load, which includes an equivalent linear electric consumer – $R + jX$ and n non-linear electric consumers of various types

Селективность метода и обсуждение результатов

Оценим чувствительность метода к помехам в измерении входного тока. Рассмотрим нагрузку (далее, Нагрузка 1), состоящую из параллельно включенных:

- последовательные соединенных резистора (100 Ом) и диода с идеальной ВАХ – таких устройств в нагрузке два;
- нелинейного резистивного устройства с ВАХ $R_3(u) = 87.5(1 + 10^{-4}u^2)$ Ом, где u – мгновенное значение напряжения – такое устройство в нагрузке одно;
- идеального резистора с сопротивлением 200/3 Ом. В качестве базисного линейного сопротивления возьмем резистор сопротивлением 200 Ом.

Определим вектор $\mathbf{J}_s$, для этого мы измерим ток нагрузки (с помощью АЦП в 1024 точках на периоде промышленной частоты) и применим быстрое преобразование Фурье. Подключив устройства по очереди к напряжению $u(t) = U\sqrt{2}\sin\omega t$, определим $I_{k,0}$ и $\dot{I}_{k,q}$, $q = \overline{1,7}$, $k = \overline{1,2}$ составим систему уравнений (1) для данной задачи:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0.445 & 0 \\ 0.707 & 0.701 & 0.707 \\ 0 & -0.3j & 0 \\ 0 & -1.84 \cdot 10^{-3} & 0.19 \\ 0 & -0.0598j & 0 \\ 0 & -1.05 \cdot 10^{-3} & 0.0508 \\ 0 & -0.0256j & 0 \\ 0 & -7.26 \cdot 10^{-4} & 0.0136 \end{bmatrix}}_{\mathbf{I}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} S_L \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{S}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.89 \\ 4.23 + 0.026j \\ 7.39 \cdot 10^{-3} - 0.6j \\ 0.186 + 3.42 \cdot 10^{-3}j \\ 2.96 \cdot 10^{-3} - 0.119j \\ 0.0487 + 1.48 \cdot 10^{-3}j \\ 1.9 \cdot 10^{-3} - 0.0512j \\ 0.012 + 5.13 \cdot 10^{-4}j \end{bmatrix}}_{\mathbf{J}_s}. \quad (2)$$

Из (2), используя метод наименьших квадратов, найдем: $S_L = 3 + 0.02j$, $S_1 = 2 - 0.02j$, $S_2 = 1 + 0.02j$. Мнимая часть обусловлена погрешностью, связанной, в основном, с конечным числом точек в осциллограмме тока. Действительно, расчет при измерении тока нагрузки в 4096 точках дает: $S_L = 3 + 0.01j$, $S_1 = 2 - 0.006j$, $S_2 = 1 + 0.005j$. Таким образом, в составе нагрузки присутствуют два устройства типа 1, одно устройство типа 2 и линейное сопротивление $200/S_L = 200/3$ Ом, как и было задано.

Выполним исследование метода на устойчивость в погрешности измерения. Рассмотрим нагрузку с тем же составом электроприемников, что и выше (Нагрузка 1). К измеренным значениям входного тока в каждой из 1024 точек добавим величину $J_{s,1} \cdot \Delta \cdot \alpha$, где $\Delta \in [10^{-2}, 5 \cdot 10^{-1}]$ – уровень погрешности, а $J_{s,1} = 4.23$ А – амплитуда первой гармоник тока нагрузки, а α – равномерно распределенная на отрезке $[0,1]$ случайная величина. Уровень погрешности $\Delta = 5 \cdot 10^{-1}$ соответствует 50% уровню погрешности.

После этого определим, как это было описано выше вектор $\mathbf{S}$, возьмем действительную часть его значений и округлим до целых. Полученный таким образом вектор для элемента k -го типа обозначим $\bar{\mathbf{S}}(\Delta) = [\bar{S}_{k,1}(\Delta), \bar{S}_{k,2}(\Delta), \dots, \bar{S}_{k,m}(\Delta)]^T$. Выполним эти действия 10^3 раз при различных случайных α и для ряда значений уровня погрешности Δ и вычислим погрешность $\delta(k, \Delta)$ определения состава устройств из соотношения:

$$\delta(k, \Delta) = 10^{-3} \sum_{i=1}^{10^3} |\bar{S}_{k,i}(\Delta) - S_k| \cdot 100\%.$$

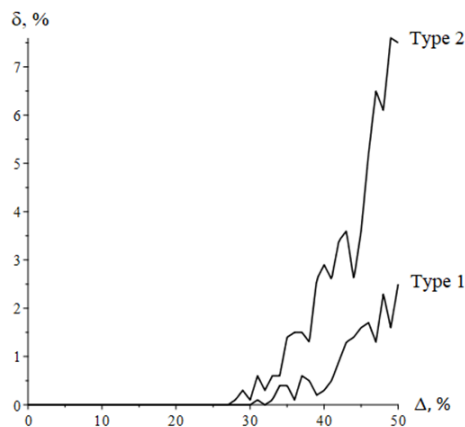


Рис. 2. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 1* и *Type 2* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 1 и Нагрузки 2

Fig. 2. Identification error in the composition of the load of *Type 1* and *Type 2* electric receivers, depending on the noise amplitude for Load 1 and Load 2

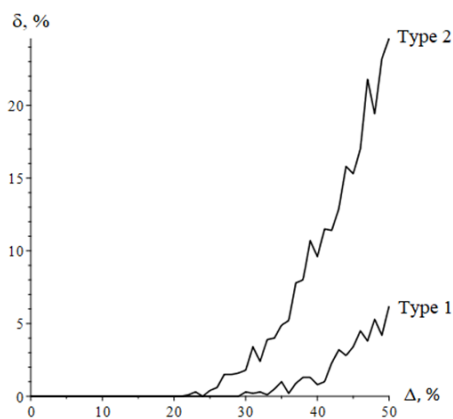


Рис. 3. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 1* и *Type 2* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 3

Fig. 3. Identification error in the composition of the load of *Type 1* and *Type 2* electric receivers, depending on the noise amplitude for Load 3

После этого для каждого типа приёмников можем построить зависимость относительно погрешности $\delta(k, \Delta)$ определения числа устройств данного типа от уровня погрешности Δ измерения входного тока (рис. 2).

Результаты, представленные на рис. 2, показывают высокую устойчивость предложенного метода идентификации состава нагрузки к погрешности измерений. Действительно, до уровня погрешности $\Delta \sim 25\%$ погрешность в определении состава нагрузки отсутствует. Здесь важно, что уровень погрешности для современных измерительных систем составляет десятые доли процента.

Повторим проделанный опыт для нагрузки, имеющей по два приёмника каждого из перечисленных выше типов и включенное параллельно им линейное активное сопротивление 100 Ом (далее Нагрузка 2). Результаты этих расчетов полностью совпали с результатами расчетов для Нагрузки 1. Соответственно, можно сделать вывод о том, что погрешности метода слабо зависят и от состава приемников.

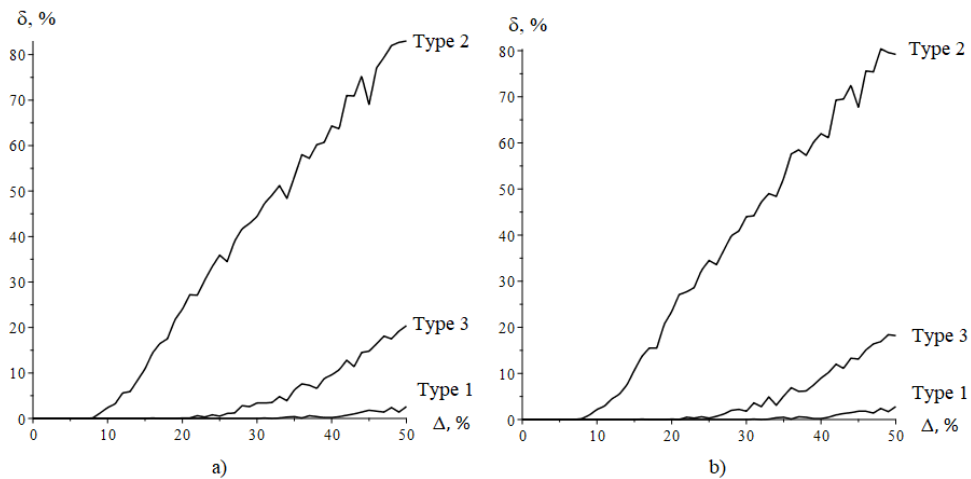


Рис. 4. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 1 – Type 3* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 4 для $m = 5$ а), и $m = 15$ – б), при числе точек измерения на периоде промышленной частоты $N = 1024$

Fig. 4. Identification error in the composition of the load of *Type 1 – Type 3* electrical receivers, depending on the noise amplitude for Load 4 for $m = 5$ а), and $m = 15$ – б), with the number of measurement points at the industrial frequency period $N = 1024$

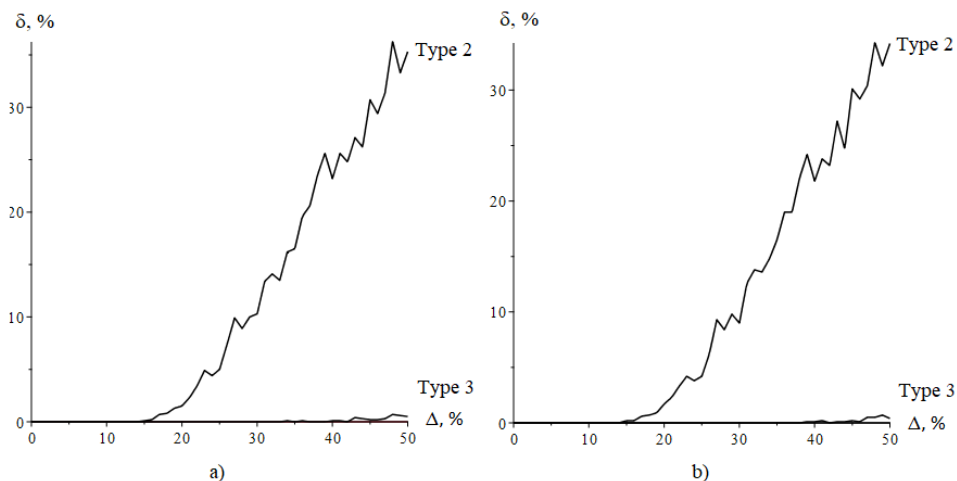


Рис. 5. Ошибка идентификации в составе нагрузки электроприемников *Type 2* и *Type 3* в зависимости от амплитуды шума для Нагрузки 4 для $m = 5$ а), и $m = 15$ – б), при числе точек измерения на периоде промышленной частоты $N = 4096$

Fig. 5. Identification error in the composition of the load of *Type 2* and *Type 3* electric receivers, depending on the noise amplitude for Load 4 for $m = 5$ а), and $m = 15$ – б), with the number of measurement points at the industrial frequency period $N = 4096$

Покажем, что решение может также быть получено для активно-реактивной нагрузки. Возьмем два устройства типа 1, одно устройство типа 2, а вместо линейного активного сопротивления, возьмем последовательное соединение активного сопротивления $170/3$ Ом и индуктивности 30 мГн (далее Нагрузка 3). Получим новый вектор $\mathbf{J}_S$ и подставим его в (2). Точное решение для S_L будет $3.43 - 0.57j$. Зависимость $\delta(k, \Delta)$ от Δ показана на рис. 3.

Рассмотрим далее, как число учитываемых гармоник влияет на точность идентификации состава нагрузки. Возьмем активное сопротивление $200/3$ Ом, одно устройства типа 1 и два резистивных нелинейных элемента: $R_2(u) = 127.3(1 + 4 \cdot 10^{-5}u^2)$ – тип 2 и $R_3(u) = 618(1 - 4 \cdot 10^{-5}u^2)$ – тип 3. ВАХ этих устройств ближе к линейной, чем у нелинейного элемента из предыдущего при-

мера (далее Нагрузка 4). Число точек N измерения на периоде промышленной частоты, в которых выполняется измерение тока, в данной задаче 1024. Зависимости $\delta(k, \Delta)$ от Δ при $m = 5$ и $m = 15$ для Нагрузки 4 показаны на рис. 4а и б. Как можно видеть, эти зависимости идентичны, то есть существенное увеличение m не повлияло на точность идентификации. Однако, если уменьшить количество гармоник до 4, решение получено не будет и при нулевом уровне шума.

Рассмотрим далее, как число точек, в которых выполняется измерение тока, влияет на точность идентификации состава нагрузки. Для этой же нагрузки проведем измерение тока в 4096 точках, то есть увеличим число точек в 4 раза. На рис. 5а и б показаны зависимости $\delta(k, \Delta)$ от Δ для нового числа точек (как и ранее, $m = 5$ и $m = 15$). Увеличение числа точек в осциллограмме тока позволяет значительно повысить точность идентификации состава нагрузки. При этом погрешность в определении числа устройств второго типа при уровне погрешности данных до 50% — нулевая.

Обсуждение результатов и выводы

Предложенный метод позволяет определить состав нагрузки потребителя за один период промышленной частоты. Соответственно метод позволяет вести непрерывный мониторинг состава нагрузки. Использование в расчетах входного тока и напряжения позволяет избежать установки измерительных приборов на территории потребителя.

Чувствительность метода к помехам слабо зависит от выбора базисных элементов, а также от точности измерения входного тока. Так, сравнивая рис. 4а и 5а, можно заметить, что увеличения числа N точек измерения входного тока на периоде позволило увеличить Δ начала роста погрешности $\delta(k, \Delta)$ для приёмника типа 2 примерно в два раза (с 8 до 16%). При этом в обоих случаях величина погрешности оставалась приемлемой для практики. Значение δ для этого типа электроприёмника при $\Delta = 50\%$ снизилось с 80 до 35.

Увеличение числа рассматриваемых гармоник входного тока не приводит к существенному улучшению точности измерений. В частности, рис. 4 и 5 показывают, что зависимости $\delta(k, \Delta)$ от Δ становятся отличными от нуля примерно при одном и том же значении Δ для каждого типа электроприёмников и достигает примерно одного и того же значения при $\Delta = 50\%$ при рассмотрении 5 или 15 гармоник входного тока.

Области эффективного применения метода, по мнению авторов, лежат в индикации работы отдельных электроприёмников в составе нагрузки в том случае, если это затруднительно сделать иным способом. Также метод может найти применение для контроля состава нагрузки потребителя для предотвращения использования опасных для сети типов нагрузки и разрешения споров, связанных с порчей имущества потребителей при нарушении качества поставляемой электроэнергии.

Особая благодарность

Выражаем благодарность и особую признательность РФФИ за поддержку по договору № 19-38-90316.

Научный проект № 19-38-90316 "Разработка методов управления активно-адаптивными сетями на основе оценки актуального состояния ЭЭС"

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Осинцев К.В., Алюков С.В. Математическое моделирование разрывных газодинамических течений с применением нового метода аппроксимации // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 38–52. DOI: 10.18721/JEST.26204

- [2] **Абед С.А., Аль Дражи Д.Ф., Бахрами М.Р.** Гармонический анализ роторно-подшипниковой системы с единичной трещиной // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 139–152. DOI: 10.18721/JEST.240312
- [3] **Solovyeva E.** A split signal polynomial as a model of an impulse noise filter for speech signal recovery // Journal of Physics: Conf. Series (JPCS). Int. Conf. on Information Technologies in Business and Industry 2016, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation – 2017. – Vol. 803, no. 1 – 012156, pp. 1–6.
- [4] **Костин В.Н., Сериков В.А.** Компьютерное моделирование режимов работы систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 1. С. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102
- [5] Технология локализации источников помех в энергосистемах Коровкин Н.В., Лысенко Г.С. 2013 Известия российской академии наук. Энергетика, с. 121–130.
- [6] **Adalev A.S., Hayakawa M., Korovkin N.V.** Identification of electric circuits: Problems and methods of solution accuracy enhancement 2005 Proceedings – IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems 1464754, с. 980–983.
- [7] Analysis of power line communication networks using a new approach based on scattering parameters matrix Issa F., Sartenaer T., Marthe E., (...), Duteau S., Pacaud A. 2002 IEEE Int. Symp. EMC, 90, с. 1043–104.
- [8] Оценка вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети при наличии в питающем напряжении высших гармоник / Сысун В.И., Олещук О.В., Соболев Н.В., Тихомирова А.А. // 2019 Международный научно-исследовательский журнал, № 2 (80), с. 20–23.
- [9] **P. Jonke, M. Makoschitz, S. Biswas, J. Stöckl, H. Ertl.** "Analysis and Verification of a Cascaded Advanced AC-Simulator with Non-Linear Loads," 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265769
- [10] **de Oliveira T.L., Moreira L.F., Carvalho T.C.O., Xavier W.D.M., Ribeiro P.F.** "Microcontroller implementation for monitoring time-varying harmonics from non-linear loads," 2016 17th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016, pp. 896–902. DOI: 10.1109/ICHQP.2016.7783377
- [11] **Gritsutenko S., Korovkin N.** (2018). Applicability of a Fast Fourier Transform for a harmonic analysis. MATEC Web of Conferences. 245.10004.10.1051/mateconf/ 201824510004
- [12] **Belany P., Bolf A., Novak M., Roch M.** "The Impact of Small Non-linear Load Operation on Accuracy of the Intelligent Measurement System," 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), 2018, pp. 0247–0252. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559679
- [13] **Kumar N., Kumar A.** "Analysis of distribution tariff structures in the presence of non-linear load", 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/POWERI.2018.8704359
- [14] **Kamel K., Laid Z., Abdallah K.** "Mitigation Of Harmonics Current Using Different Control Algorithms Of Shunt Active Power Filter For Non-Linear Loads", 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICASS.2018.8652066
- [15] **Adalev A.S., Korovkin N.V., Hayakawa M.** Identification of electric circuits de-scribed by illconditioned mathematical models 2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 53 (1), с. 78–91.
- [16] **Chen C., Chu C.** "A Novel Computational Model for Non-Linear Divisible Loads on a Linear Network," in IEEE Transactions on Computers, vol. 65, no. 1, pp. 53–65, 1 Jan. 2016. DOI: 10.1109/TC.2015.2419654
- [17] Идентификация RLC параметров заземляющих устройств опор воздушных линий с тросом импульсным методом / Кривошеев С.И., Бочаров Ю.Н., Коровкин Н.В., Нетреба К.И., Шишигин С.Л. // Труды Кольского научного центра РАН. 2010. № 1 (1). С. 26–32.
- [18] **Насырова О.А., Тульский В.Н.** Применение преобразования Фурье для определения состава электроприемников, вносящих искажение в форму кривой тока. Электричество, 2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОДРЕНКОВ Евгений Александрович — ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: evgenii.bodrenkov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1719-5222>

КОРОВКИН Николай Владимирович — заведующий кафедрой, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

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

СЕЛИТРЕНИКОВ Дмитрий Алексеевич — студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина).

E-mail: dm.selitrenikov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0992-6398>

REFERENCES

- [1] K.V. Osintsev, S.V. Alyukov, Matematicheskoye modelirovaniye razryvnykh gazo-dinamicheskikh techeniy s primeneniym novogo metoda approksimatsii // Materialovedeniye. Energetika. 2020. T. 26, № 2. S. 38–52. DOI: 10.18721/JEST.26204
- [2] S.A. Abed, D.F. Al Drazhi, M.R. Bakhrami, Garmonicheskiy analiz rotno-podshipnikovoy sistemy s yedinichnoy treshchinoy // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 3. S. 139–152. DOI: 10.18721/JEST.240312
- [3] E. Solovyeva, A split signal polynomial as a model of an impulse noise filter for speech signal recovery // Journal of Physics: Conf. Series (JPCS). Int. Conf. on Information Technologies in Business and Industry 2016, 21–26 September 2016, Tomsk, Russian Federation – 2017. – Vol. 803, no. 1 – 012156, pp. 1–6.
- [4] V.N. Kostin, V.A. Serikov, Kompyuternoye modelirovaniye rezhimov raboty sistem elektrosnabzheniya s nelineynoy nagruzkoy // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2019. T. 25, № 1. S. 19–29. DOI: 10.18721/JEST.25102
- [5] Tekhnologiya lokalizatsii istochnikov pomekh v energosistemakh Korovkin N.V., Lysenko G.S. 2013 Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. Energetika, s. 121–130.
- [6] A.S. Adalev, M. Hayakawa, N.V. Korovkin, Identification of electric circuits: Problems and methods of solution accuracy enhancement 2005 Proceedings – IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems 1464754, s. 980–983.
- [7] Analysis of power line communication networks using a new approach based on scattering parameters matrix Issa F., Sartenauer T., Marthe E., (...), Duteau S., Pacaud A. 2002 IEEE Int. Symp. EMC, 90, s. 1043–104.
- [8] Otsenka vklada nelineynoy nagruзки v vysshiye garmoniki napryazheniya seti pri nalichii v pitayushchem napryazhenii vysshikh garmonik Sysun V.I., Oleshchuk O.V., Sobolev N.V., Tikhomirova A.A. 2019 Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal, № 2 (80), C. 20–23.
- [9] P. Jonke, M. Makoschitz, S. Biswas, J. Stöckl, H. Ertl, "Analysis and Verification of a Cascaded Advanced AC-Simulator with Non-Linear Loads," 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2020, pp. 1–7. DOI: 10.1109/COMPEL49091.2020.9265769
- [10] T.L. de Oliveira, L.F. Moreira, T.C.O. Carvalho, W.D.M. Xavier, P.F. Ribeiro, "Microcontroller implementation for monitoring time-varying harmonics from non-linear loads," 2016 17th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016, pp. 896–902. DOI: 10.1109/ICHQP.2016.7783377
- [11] S. Gritsutenko, N. Korovkin, (2018). Applicability of a Fast Fourier Transform for a harmonic analysis. MATEC Web of Conferences. 245.10004.10.1051/mateconf/ 201824510004

- [12] **P. Belany, A. Bolf, M. Novak, M. Roch**, "The Impact of Small Non-linear Load Operation on Accuracy of the Intelligent Measurement System," 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), 2018, pp. 0247–0252. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559679
- [13] **N. Kumar, A. Kumar**, "Analysis of distribution tariff structures in the presence of non-linear load," 2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/POWERI.2018.8704359
- [14] **K. Kamel, Z. Laid, K. Abdallah**, "Mitigation Of Harmonics Current Using Different Control Algorithms Of Shunt Active Power Filter For Non-Linear Loads," 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS), 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICASS.2018.8652066
- [15] **A.S. Adalev, N.V. Korovkin, M. Hayakawa**, Identification of electric circuits described by illconditioned mathematical models 2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers 53 (1), s. 78–91.
- [16] **C. Chen, C. Chu**, "A Novel Computational Model for Non-Linear Divisible Loads on a Linear Network," in IEEE Transactions on Computers, vol. 65, no. 1, pp. 53–65, 1 Jan. 2016. DOI: 10.1109/TC.2015.2419654
- [17] Identifikatsiya RLC parametrov zazemlyayushchikh ustroystv opor vozdukhnykh liniy s trosom impulsnym metodom Krivosheyev S.I., Bocharov Yu.N., Korovkin N.V., Netreba K.I., Shishigin S.L. Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2010. № 1 (1). S. 26–32.
- [18] **O.A. Nasyrova, V.N. Tul'skiy**, Primeneniye preobrazovaniya Fur'ye dlya opredeleniya sostava elektropriyemnikov, vnosyashchikh iskazheniya v formu krivoy toka. Elektrichestvo, 2019.

THE AUTHORS

BODRENKOV Evgeniy A. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: evgenii.bodrenkov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1719-5222>

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

SELITRENIKOV Dmitriy A. — *St. Petersburg Electrotechnical University "LETI".*
E-mail: dm.selitrenikov@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0992-6398>

Статья поступила в редакцию 07.07.2021; одобрена после рецензирования 12.07.2021; принята к публикации 23.08.2021.

The article was submitted 07.07.2021; approved after reviewing 12.07.2021; accepted for publication 23.08.2021.

Научная статья

УДК 621.319.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>

И.О. Иванов ✉, Д.Ю. Гливенко, А. Ходжамов

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

✉ ivanov.eicc@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА РАНДОМИЗАЦИИ В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

Аннотация. Численное моделирование физических процессов является эффективным методом при проектировании новых типов энергоемких электрических конденсаторов. В современном силовом оборудовании широко используются пленочные конденсаторы, так как обладают наибольшим значением удельной запасаемой энергии. Как правило, численное моделирование использует идеальные геометрические объекты и физические условия. Данный факт объясняет некоторое отличие результатов эксперимента и моделирования. В данной работе представлено применение метода рандомизации в изучении электрофизических процессов в электродах металлопленочных конденсаторов. В качестве примера возможного применения представлена численная модель электротеплового разрушения в сегментированных конденсаторных электродах в процессе самовосстановления. Полученные результаты численного моделирования имеют статистический разброс, который коррелирует с экспериментальными данными. Предложенный метод рандомизации является дополнением к проведенным исследованиям в данном научном направлении.

Ключевые слова: металлопленочный конденсатор; сегментированные электроды; самовосстановление; численное моделирование; метод рандомизации.

Для цитирования:

Иванов И.О., Гливенко Д.Ю., Ходжамов А. Использование метода рандомизации в численном моделировании электрофизических процессов в металлопленочных конденсаторах // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 30–41. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>*I.O. Ivanov* ✉, *D.Y. Glivenko*, *A. Hojamov*

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

✉ ivanov.eicc@yandex.ru

RANDOMIZATION METHOD APPLICATION IN NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROPHYSICAL PROCESSES IN METALLIZED FILM CAPACITORS

Abstract. Numerical simulation of physical processes is an effective design method of new energy-intensive electric capacitor types. Polymer film capacitors are widely used in modern power equipment, because of their extremely high value of specific energy. As a rule, numerical simulation uses ideal geometric objects and physical conditions. This fact explains some difference between experimental and simulation results. This paper presents the application of randomization method in the study of electrophysical processes in metallized film capacitors' electrodes. As an example of possible application, the numerical model of segmented capacitors electrodes' electrothermal destruction during self-healing process is presented. The obtained results of numerical simulation have a statistical dispersion that correlates with the experimental data. Suggested randomization method is an addition to the research carried out in this scientific direction.

Keywords: metallized film capacitor; segmented electrodes; self-healing; numerical simulation; randomization method.

Citation:

I.O. Ivanov, D.Y. Glivenko, A. Hojamov, Randomization method application in numerical simulation of electrophysical processes in metallized film capacitors, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 30–41, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27403>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Электрические конденсаторы являются важными и незаменимыми компонентами электротехники и электроэнергетики. Область применения конденсаторов достаточно обширная: от элементов микроэлектроники до высоковольтных импульсных устройств. Не менее разнообразным является ассортимент выпускаемых конденсаторов, который характеризуется многообразием используемых диэлектрических материалов, металлов электродов и вспомогательных элементов (корпуса, изоляционные выводы и т.д.) [1–4]. За период эксплуатации более 100 лет электрические конденсаторы сильно изменились. Непрерывно улучшаются материалы, из которых изготавливаются конденсаторы, совершенствуется технология их изготовления. В настоящее время методы численного моделирования широко используются при проектировании различных устройств и конструкций, а также для обработки результатов экспериментальных исследований. Конденсаторная промышленность не является исключением. На этапе проектирования осуществляется численное моделирование работы будущего изделия. При этом можно в широких пределах варьировать конструкцию конденсатора и свойства используемых материалов. Таким образом можно выбрать наилучшие варианты конструкции без изготовления пилотных образцов и проведения экспериментальных исследований [5–10].

Применительно к конденсаторной технике численное моделирование применяется для расчета электрических и магнитных полей, распределения температуры, определения эквивалентных

параметров (сопротивление, емкость и индуктивность). Моделирование также используется для определения влияния электрических, токовых и тепловых перегрузок на работу конденсаторов. Современные вычислительные ресурсы и программные пакеты позволяют проводить расчеты, связанные со старением и деградацией конденсаторов и их компонентов [11].

Основной недостаток численного моделирования связан с использованием идеальных геометрических объектов (гладкие грани и поверхности) и идеальных физических условий (совершенные электрические и тепловые контакты, равномерное распределение температуры и электрического потенциала, и т.д.). При моделировании физических процессов, имеющих статистический разброс, такие идеальные условия часто создают некоторую ошибку в полученных результатах расчета. Решением данной проблемы может быть задание статистического отклонения при построении геометрии, задании параметров среды и граничных условий. Такое статистическое отклонение должно генерироваться случайным образом, а многократное моделирование одного и того же физического процесса должно давать различный результат при каждом последующем запуске расчета.

В данной работе предложен метод рандомизации для использования в численном моделировании. Метод включает в себя генерирование случайных неровностей при построении геометрии и случайное определение ряда физических параметров численной модели.

Таким образом, **целью данной работы** является обоснование метода рандомизации в численном моделировании. Для примера расчета использована модель электротеплового разрушения сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов в процессе самовосстановления. Металлопленочные конденсаторы (МПК) — тип пленочных конденсаторов, в которых используется тонкий слой металлизации (несколько десятков нанометров) в качестве электродов. Отличительной особенностью таких конденсаторов является способность к самовосстановлению (СВ), то есть восстановлению работоспособности после пробоя диэлектрика. Для ограничения энергии СВ и повышения надежности конденсаторов используются сегментированные электроды. В этом случае электроды разделены на сегменты, которые соединены между собой узкими мостиками. При пробое диэлектрика за счет протекающего тока происходит электротепловое разрушение мостиков и изолирование поврежденного сегмента вместе с каналом пробоя [12–15].

Методы и материалы

Экспериментальные исследования

Экспериментальное исследование электротеплового разрушения проводилось на образцах конденсаторной полипропиленовой (ПП) пленки с Zn сегментированной металлизацией. Толщина пленки составляла 7 мкм, а толщина металлизации 20 нм. Вид экспериментальной ячейки представлен на рис. 1. Для имитации процесса СВ потенциальный электрод располагался на краю образца (со стороны утолщенного края), а цилиндрический заземленный электрод устанавливался в середине образца. Для соблюдения условий теплоотвода, соответствующим реальным конденсаторам, сверху закреплялась дополнительная неметаллизированная ПП пленка. С помощью генератора прямоугольных импульсов происходила имитация пробоя пленки, сопровождающаяся электротепловым разрушением соединительных мостиков.

Экспериментальные образцы подвергались воздействию прямоугольных импульсов напряжения различной амплитуды (60 – 120 В). Длительность импульсов составляла 100 мкс, что значительно больше длительности перегорания соединительных мостиков. Изменяя амплитуду импульсов напряжения, были получены различные длительности электротеплового разрушения. Импульсы напряжения и тока регистрировались с помощью цифрового осциллографа. Упрощенная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.

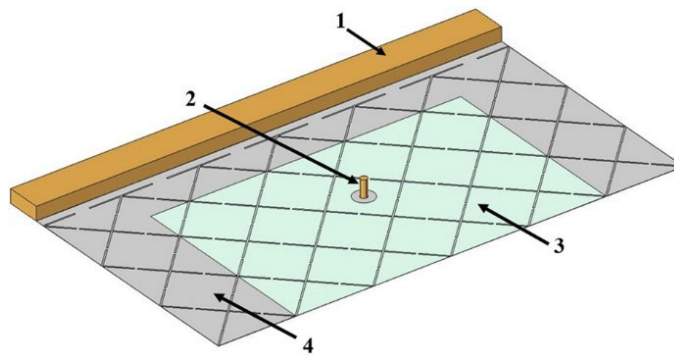


Рис. 1. Экспериментальная ячейка для исследования электротеплового разрушения сегментированной металлизации. 1 – потенциальный электрод; 2 – заземленный электрод; 3 – верхняя неметаллизированная пленка; 4 – нижняя пленка с сегментированной металлизацией

Fig. 1. Experimental cell for investigation of electrothermal destruction in segmented metallization. 1 – potential electrode; 2 – ground electrode; 3 – upside polymer film; 4 – downside polymer film with segmented metallization

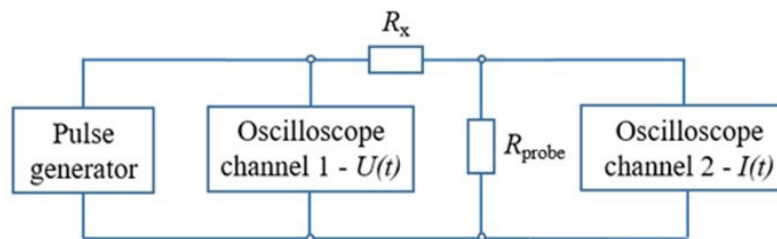


Рис. 2. Упрощенная схема экспериментальной установки.

R_x – экспериментальный образец, R_{probe} – токовый шунт

Fig. 2. Simplified scheme of experimental setup. R_x – experimental sample, R_{probe} – current probe

Расчетная модель

Для моделирования электротеплового разрушения соединительных мостиков и последующего изолирования сегментов в процессе СВ использовался программный пакет COMSOL Multiphysics. В расчетной модели были использованы следующие программные модули:

- Electric Currents in Shells – для расчета поля токов в металлизации;
- Electrical Circuit – для учета элементов внешней цепи и переходного сопротивления;
- Heat Transfer in Solids – для расчета теплового поля.

Расчет осуществлялся во временной области (тип решения Time Dependent) с использованием 3-х мерной геометрии. В расчетной модели использованы уравнения поля токов и уравнение теплопроводности:

$$\begin{aligned} \nabla J &= 0, \\ E &= -\nabla \varphi, \\ J &= \sigma(T)E; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\rho(T)C(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \cdot \nabla^2 T + Q_V, \quad (2)$$

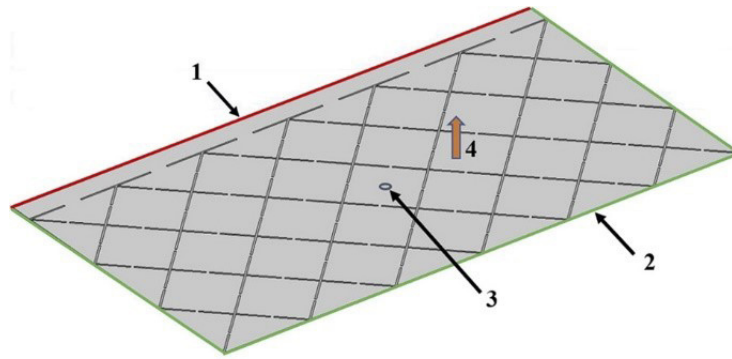


Рис. 3. Расчетная область и граничные условия. 1 – электрический потенциал; 2 – электрическая изоляция; 3 – нулевой потенциал; 4 – тепловой поток от металлизации в верхнюю пленку

Fig. 3. The calculation geometry and boundary conditions. 1 – electric potential; 2 – electric insulation; 3 – ground; 4 – heat flux from metallization to upside film

где J – вектор плотности тока, E – вектор напряженности электрического поля, ϕ – электрический потенциал, $\sigma(T)$, $\lambda(T)$, $\rho(T)$, $C(T)$ – удельные электропроводность, теплопроводность и теплоемкость материалов, T – температура, Q_v – объемное тепловыделение. Данная численная модель учитывает температурные зависимости электрических и тепловых параметров материалов, зависимость электропроводности металлизации от ее толщины, а также скрытую теплоту плавления и испарения металла. Пример расчетной области и граничные условия изображены на рис. 3.

Фазовый переход и испарение металлизации в представленной численной модели реализовано с помощью изменения физических свойств материалов. При достижении температуры испарения T_{ev} происходит ступенчатое изменение электропроводности и теплопроводности:

$$\sigma_{Me} = \begin{cases} \sigma(T), & T < T_{ev} \\ 1S / m, & T \geq T_{ev} \end{cases}, \quad (3)$$

$$\lambda_{Me} = \begin{cases} \lambda(T), & T < T_{ev} \\ 10^{-2} W / m \cdot K, & T \geq T_{ev} \end{cases}. \quad (4)$$

Метод рандомизации заключается в случайном генерировании неровностей при построении геометрии модели и в случайном задании физических параметров и граничных условий. В данной расчетной модели реализовано случайное построение неровности на краю металлизации в сегментированном узоре. Элементы расчетной области, которым необходимо придать случайную неровность, строятся с помощью параметрических кривых. Уравнение параметрической кривой имеет вид

$$\begin{aligned} X(r) &= r, \\ Y(r) &= Y_0(r) + S(r), \end{aligned} \quad (5)$$

где r – значение координаты, $Y_0(r)$ – координата невозмущенной кривой, $S(r)$ – периодическая функция случайных возмущений. Данная функция определяется выражением

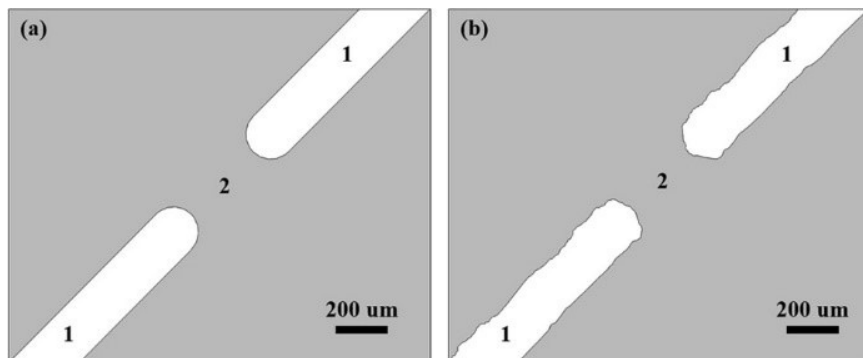


Рис. 4. Вид расчетной области без использования метода рандомизации (a) и с использованием (b). 1 – межсегментный промежуток; 2 – соединительный мостик

Fig. 4. The view of calculation geometry without random irregularities (a) and with it (b). 1 – intersegment gaps; 2 – connecting gate

$$S(r) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i r + \theta_i), \quad (6)$$

где A_i , ω_i , θ_i – случайные значения амплитуды, частоты и сдвига фазы периодической функции, N – число периодических функций. Далее с помощью средств построения геометрии программного пакета осуществляется поворот параметрической кривой на требуемый угол и ее сдвиг по координате. Для построения элементов окружности использовались уравнения

$$\begin{aligned} X(r) &= \cos(2\pi \cdot r)(R + S(r)), \\ Y(r) &= \sin(2\pi \cdot r)(R + S(r)). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь R – радиус окружности, r – безразмерный параметр, который принимает значения от 0 до 1.

В данной расчетной модели используются 2 физических параметра, которые определяются случайной функцией: переходное сопротивление на границе потенциального электрода и металлизации R_t и величина теплового потока от металлизации в верхнюю пленку Q_{up} . Данные параметры варьировались в ходе экспериментальных исследований. Степень вариации была установлена при разработке численной модели и составляет $\sim 10\%$.

Для генерации случайных значений использовался встроенный алгоритм пакета COMSOL Multiphysics. Случайная генерация параметров A_i , ω_i , θ_i была подобрана таким образом, чтобы неоднородность границы металлизации варьировалась в пределах ± 5 мкм, что соответствует экспериментальным образцам. Переходное сопротивление принимало значение $R_t = 1.5 \pm 0.3 \Omega$, а величина теплового потока $Q_{up} = (0.75 \pm 0.05) \times Q_{down}$. Здесь Q_{down} – значение теплового потока из металлизации в нижнюю пленку. Вид расчетной области с использованием случайных неровностей и без них представлен на рис. 4. Изменяя начальный параметр функций рандомизации «Random seed», получается различная конфигурация неровностей в расчетной области и значения R_t и Q_{up} для каждого нового расчета.

Результаты и обсуждение

Энергетические характеристики процесса электротеплового разрушения

Экспериментальные и численные исследования электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК дают количественную оценку их эффективности в случае пробоя

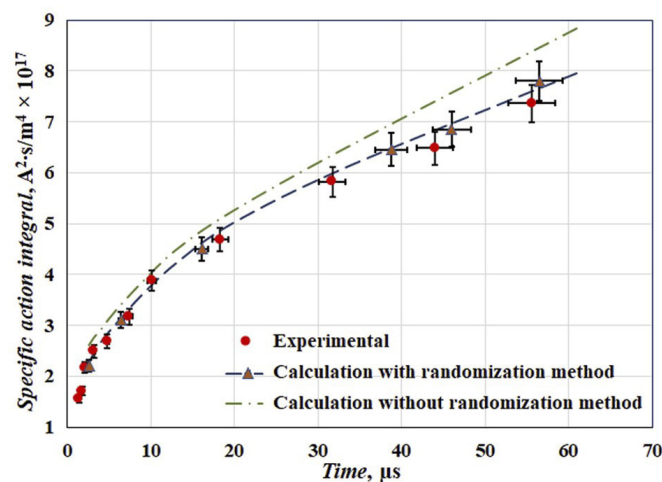


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные зависимости интеграла действия тока от длительности разрушения
Fig. 5. Experimental and calculation dependencies of specific action integral versus duration of electrothermal destruction

диэлектрика и последующего процесса СВ. Процесс изолирования сегмента характеризуется значением энергии W , затраченной на испарение соединительных мостиков, и длительностью электротеплового разрушения τ . В случаях, когда необходимо сравнить эффективность сегментированных электродов, имеющих разный металл металлизации или узор металлизации, удобно использовать значение интеграла действия тока

$$J = \int_0^{\tau} \left(\frac{I(t)}{4S_{fuse}} \right)^2 dt, \quad (8)$$

где $I(t)$ — значение тока в цепи, S_{fuse} — площадь соединительного мостика. Так как в исследуемой металлизации сегменты соединены четырьмя мостиками, то это значение учтено в формуле выше.

Зависимости интеграла действия тока от времени разрушения $J(\tau)$ могут быть использованы для оценки эффективности сегментированной металлизации и сравнения различных типов сегментированных электродов между собой [9–11]. На рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные зависимости $J(\tau)$. Видно, что оба типа расчетных зависимостей хорошо соответствуют экспериментальным данным. Однако, численная модель без метода рандомизации дает результаты на 10 – 15 % отличающиеся от экспериментальных значений. Результаты расчета численной модели с методом рандомизации отличаются от экспериментальных на величину не более 5 %. Различие расчетных и экспериментальной зависимостей объясняется наличием неоднородностей в металлизации. Расчетная модель с методом рандомизации учитывает неоднородности на границе металлизации, но не учитывает неоднородностей толщины и возможных микроскопических дефектов на поверхности.

На рис. 6 и 7 представлены логнормальные распределения интеграла действия тока и длительности разрушения для различных значений потенциала на контактной границе. Статистические распределения также показывают различия на величину не более 5 % между экспериментальными и расчетными данными. Следует отметить, что значение потенциала на границе — это не пробивное напряжение конденсатора во время работы. Данное значение потенциала обеспечивает плотность тока в соединительных мостиках, как в случае реального СВ.

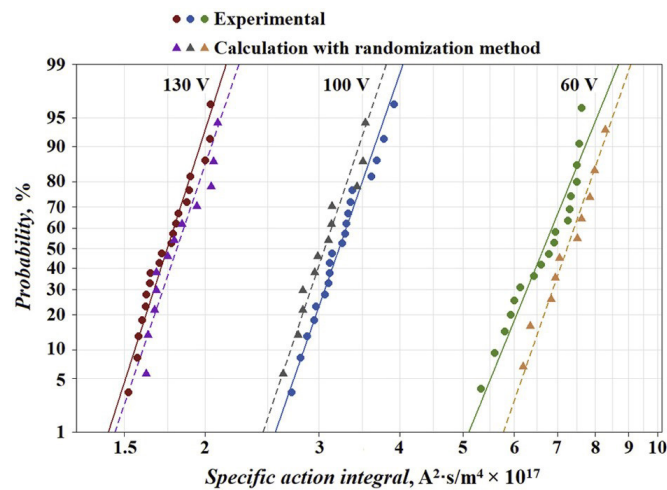


Рис. 6. Логнормальные распределения интеграла действия тока для различного значения потенциала
 Fig. 6. Lognormal distributions of specific action integral for different value of potential on the contact boundary

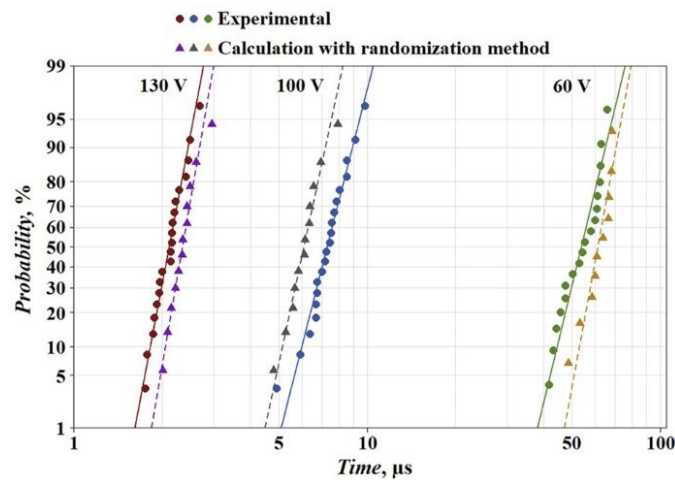


Рис. 7. Логнормальные распределения длительности электротеплового разрушения
 для различного значения потенциала

Fig. 7. Lognormal distributions of duration of electrothermal destruction
 for different value of potential on the contact boundary

Эффективность параллельных вычислений

Представленная численная модель имеет $\sim 6 \times 10^5$ степеней свободы и решалась с помощью суперкомпьютерного центра СПбПУ. Для повышения скорости вычислений использовалось параллельное решение нескольких задач на одном вычислительном узле. Один узел имеет 56 вычислительных ядер и 64 Гб ОЗУ. На рис. 8 представлена гистограмма относительной длительности расчета модели при различном числе параллельно вычисляемых задач, где N_p — число параллельных задач и t_0 — время расчета заданного числа N_p , решаемых последовательно на 1 узле. Установлено, что для данной численной модели наиболее эффективным является запуск 7 параллельных задач. При большем значении N_p проявляется недостаток оперативной памяти, что замедляет вычисления.

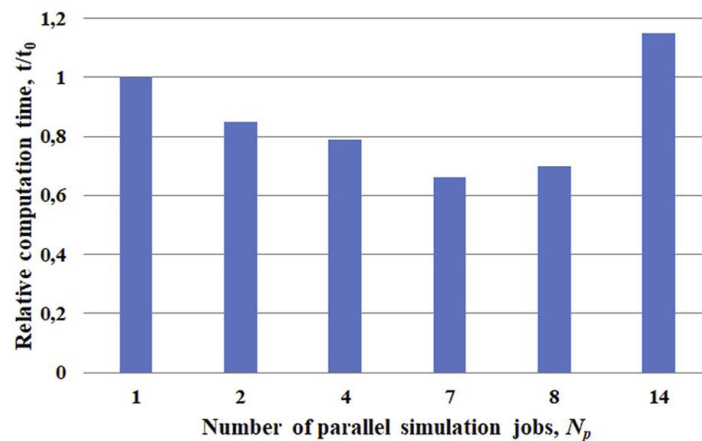


Рис. 8. Гистограмма относительного времени расчета для различного числа параллельных задач
Fig. 8. The histogram of relative computation time for a different number of parallel simulation jobs

Заключение

Метод рандомизации был использован в численной модели электротеплового разрушения сегментированных электродов МПК. Метод рандомизации включает в себя генерацию случайных неровностей на границе металлизации, а также случайное вариацию переходного сопротивления на границе потенциального электрода и металлизации, и величины теплового потока в дополнительную верхнюю пленку. Данный метод дополняет разработанную ранее численную модель и позволяет получить большую сходимость экспериментальных и расчетных данных. Тем не менее, более сложная геометрия расчетной области требует более детальной сетки конечных элементов, что сильно усложняет расчет. На практике могут быть использованы оба типа численных моделей с одинаковой эффективностью, но необходимо учитывать возможное отклонение от экспериментальных данных.

Для представленной расчетной модели с методом рандомизации применен метод параллельных вычислений нескольких задач. Установлено, что для данных параметров вычислительного узла наиболее эффективным является запуск 7 параллельных задач.

Метод рандомизации также может быть использован для генерации случайных неровностей поверхностей 3-х мерных объектов. Метод также позволяет получить случайное распределение физических величин в расчетной области, что может быть использовано в численном моделировании статистически случайных процессов, например электрического пробоя диэлектриков, электрического взрыва проводников и многих других.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ №19-79-10075.

Результаты расчетов были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Gnonhoue O.G., Velazquez-Salazar A., David É., Preda I. Review of technologies and materials used in high-voltage film capacitors // *Polymers*, 13 (5) (2021) 766–785.

- [2] **Ho J., Jow T.R., Boggs S.** Historical introduction to capacitor technology // IEEE Electrical Insulation Magazine, 26 (1) (2010) 20–25.
- [3] **Sarjeant W.J., Zirnheld J., MacDougall F.W.** Capacitors // IEEE Transactions on Plasma Science, 26 (5) (1998) 1368–1392.
- [4] **Кучинский Г.С., Назаров Н.И.** Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1992. 319 с.
- [5] **Liang Y., Wang D., Gao L., Liu D.** Calculation of Temperature Field in Power Capacitor // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62 (5) (2015) 2788–2794.
- [6] **Wang Z., Yan F., Xu M., Wang Z., Wang X., Xu Z.** Influence of External Factors on Self-healing Capacitor Temperature Field Distribution and Its Validation // IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (7) (2017) 1680–1688.
- [7] **Furlan V., Glinšek S., Kmet B., Pečnik T., Malič B., Vidmar M.** Influence of Numerical Method and Geometry Used by Maxwell's Equation Solvers on Simulations of Ferroelectric Thin-Film Capacitors // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63 (3) (2015) 891–896.
- [8] **Zheng L., Zhang Y., Bakir M.S.** Full-Chip Power Supply Noise Time-Domain Numerical Modeling and Analysis for Single and Stacked ICs // IEEE Transactions on Electron Devices, 63 (3) (2016) 1225–1231.
- [9] **Ivanov I., Glivenko D., Feklistov E., Belko V., Kulbako K.** Efficiency Evaluation of Electrodes Segmentation Patterns for Metallized Film Capacitors // 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (2020) 1–5.
- [10] **Иванов И.О., Белько В.О., Гливенко Д.Ю., Феклистов Е.Г., Кульбако К.А.** Исследование эффективности сегментированных электродов металлопленочных конденсаторов // Проблемы региональной энергетики, 47 (3) (2020) 1–9.
- [11] **Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Plotnikov A.P., Feklistov E.G.** Application of Numerical Simulation for Metallized Film Capacitors Electrodes Design // IEEE Access, 9 (2021) 80945–80952.
- [12] **Belko V.O., Emelyanov O.A., Ivanov I.O., Plotnikov A.P.** Self-Healing Processes of Metallized Film Capacitors in Overload Modes — Part 1: Experimental Observations // IEEE Transactions on Plasma Science, 49 (5) (2021) 1580–1587.
- [13] **Belko V., Glivenko D., Emelyanov O., Ivanov I., Plotnikov A.** Current pulse polarity effect on metalized film capacitors failure // IEEE Transactions on Plasma Science, 45 (6) (2017) 1020–1025.
- [14] **Li H., Li H., Li Z., Lin F., Wang W., Wang B., Huang X., Guo X.** Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film // Microelectronics Reliability, 55 (12) (2015) 2721–2726.
- [15] **Makdessi M., Sari A., Venet P.** Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation // Microelectronics Reliability, 54 (9-10) (2014) 1823–1827.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Иван Олегович — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6352-6187>

ГЛИВЕНКО Дмитрий Юрьевич — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: dmitry141094@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4120>

ХОДЖАМОВ Ахмет — студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: akhodzhamov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-8281>

REFERENCES

- [1] **O.G. Gnonhoue, A. Velazquez-Salazar, É. David, I. Preda**, Review of technologies and materials used in high-voltage film capacitors // *Polymers*, 13 (5) (2021) 766–785.
- [2] **J. Ho, T.R. Jow, S. Boggs**, Historical introduction to capacitor technology // *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 26 (1) (2010) 20–25.
- [3] **W.J. Sarjeant, J. Zirnheld, F.W. MacDougall**, Capacitors // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 26 (5) (1998) 1368–1392.
- [4] **G.S. Kuchinskiy, N.I. Nazarov**, *Silovyye elektricheskiye kondensatory*. M.: Energoatomizdat, 1992. 319 s.
- [5] **Y. Liang, D. Wang, L. Gao, D. Liu**, Calculation of Temperature Field in Power Capacitor // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (5) (2015) 2788–2794.
- [6] **Z. Wang, F. Yan, M. Xu, Z. Wang, X. Wang, Z. Xu**, Influence of External Factors on Self-healing Capacitor Temperature Field Distribution and Its Validation // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45 (7) (2017) 1680–1688.
- [7] **V. Furlan, S. Glinšek, B. Kmet, T. Pečnik, B. Malič, M. Vidmar**, Influence of Numerical Method and Geometry Used by Maxwell's Equation Solvers on Simulations of Ferroelectric Thin-Film Capacitors // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63 (3) (2015) 891–896.
- [8] **L. Zheng, Y. Zhang, M.S. Bakir**, Full-Chip Power Supply Noise Time-Domain Numerical Modeling and Analysis for Single and Stacked ICs // *IEEE Transactions on Electron Devices*, 63 (3) (2016) 1225–1231.
- [9] **I. Ivanov, D. Glivenko, E. Feklistov, V. Belko, K. Kulbako**, Efficiency Evaluation of Electrodes Segmentation Patterns for Metallized Film Capacitors // 2020 IEEE 61th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) (2020) 1–5.
- [10] **I.O. Ivanov, V.O. Belko, D.Yu. Glivenko, Ye.G. Feklistov, K.A. Kulbako**, Issledovaniye effektivnosti segmentirovannykh elektrodov metalloplenochnykh kondensatorov // *Problemy regionalnoy energetiki*, 47 (3) (2020) 1–9.
- [11] **V.O. Belko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov, A.P. Plotnikov, E.G. Feklistov**, Application of Numerical Simulation for Metallized Film Capacitors Electrodes Design // *IEEE Access*, 9 (2021) 80945–80952.
- [12] **V.O. Belko, O.A. Emelyanov, I.O. Ivanov, A.P. Plotnikov**, Self-Healing Processes of Metallized Film Capacitors in Overload Modes — Part 1: Experimental Observations // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49 (5) (2021) 1580–1587.
- [13] **V. Belko, D. Glivenko, O. Emelyanov, I. Ivanov, A. Plotnikov**, Current pulse polarity effect on metalized film capacitors failure // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 45 (6) (2017) 1020–1025.
- [14] **H. Li, H. Li, Z. Li, F. Lin, W. Wang, B. Wang, X. Huang, X. Guo**, Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film // *Microelectronics Reliability*, 55 (12) (2015) 2721–2726.
- [15] **M. Makdessi, A. Sari, P. Venet**, Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation // *Microelectronics Reliability*, 54 (9-10) (2014) 1823–1827.

THE AUTHORS

IVANOV Ivan O. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: ivanov.eicc@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6352-6187>

GLIVENKO Dmitriy Y. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: dmitry141094@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3524-4120>

HOJAMOV Akhmet — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: akhodzhamov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5523-8281>

Статья поступила в редакцию 15.07.2021; одобрена после рецензирования 22.07.2021; принята к публикации 14.09.2021.

The article was submitted 15.07.2021; approved after reviewing 22.07.2021; accepted for publication 14.09.2021.

Научная статья

УДК 621.315

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

Э.Р. Маннанов ✉

АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия

✉ emil-mannanov@mail.ru

О ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН: ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННОЙ И ЗАРУБЕЖНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аннотация. В статье приведен обзор отечественных и зарубежных публикаций, касающихся вопросов повышения теплофизических параметров с сохранением электрофизических, механических и технологических свойств полимерных материалов, пропиточных лаков, электроизоляционных лент и композитных материалов, применяемых в качестве электрической изоляции в высоковольтном оборудовании. Обзор проводился с ретроспективной 20 лет в отношении России, ЕАПВ, США, Германии, Франции, Великобритании, Японии, ЕПВ, РСТ с помощью базы данных Российского патентного ведомства, базы данных Orbit, базы данных Европейского патентного ведомства, Евразийского патентного ведомства и сети Интернет. В ходе выполнения инженерно-технического анализа обобщены известные данные, опубликованные в открытой научно-технической печати, оценен и освещен уровень технического развития. Выполнен сравнительный анализ характеристик полимерных материалов, наполненных высокотеплопроводными диэлектрическими частицами и обозначены основные тенденции развития объекта исследования.

Ключевые слова: электроизоляционный материал, статорная обмотка, слюдосодержащая лента, высокотеплопроводная диэлектрическая лента, композитный материал.

Для цитирования:

Маннанов Э.Р. О диэлектрических материалах с высокой теплопроводностью для систем электрической изоляции высоковольтных электрических машин: обзор отечественной и зарубежной литературы // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 42–67. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

E.R. Mannanov ✉

JSC "Power machines", St. Petersburg, Russia

✉ emil-mannanov@mail.ru

ABOUT DIELECTRIC MATERIALS WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY FOR ELECTRICAL INSULATION SYSTEMS OF HIGH-VOLTAGE ELECTRIC MACHINES: A REVIEW OF DOMESTIC AND FOREIGN LITERATURE

Abstract. The article presents a review of domestic and foreign sources relating to problems of improving thermophysical parameters of polymer materials, impregnating varnishes, electrical insulating tapes and composite materials used as electrical insulation in high-voltage equipment, while retaining their electrophysical, mechanical and technological properties. The author reviewed publications for the past 20 years published by the authors from Russia, USA, Germany, France, Great Britain, Japan. The study used the Russian Patent Office database, Orbit database, European Patent Office database, Eurasian Patent Office, Patent Cooperation Treaty and the Internet. In the course of the engineering and technical analysis, the known data published in the open scientific and technical press were summarized, the level of technical development was assessed and highlighted. The results include a comparative analysis of the characteristics of polymer materials filled with highly heat-conducting dielectric particles and a list of the main trends in the development of the research object.

Keywords: electrical insulating material, stator winding, mica tape, high thermal conductivity dielectric tape, composite material.

Citation:

E.R. Mannanov, About dielectric materials with high thermal conductivity for electrical insulation systems of high-voltage electric machines: a review of domestic and foreign literature, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 42–67, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27404>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Инженерно-технический анализ. Известными направлениями совершенствования современных электроизоляционных слюдосодержащих материалов являются: увеличение отвода тепла в системе статорной обмотки электрических машин с воздушным охлаждением путем уменьшения толщины корпусной изоляции; увеличения допустимой рабочей температуры корпусной изоляции и увеличение коэффициента теплопроводности корпусной изоляции [1, 2].

Итак, увеличение допустимой рабочей температуры достижимо путем замены компонентов корпусной изоляционной ленты на пара-арамидные волокна. Они способны сохранять стабильность размеров и высокую прочность в сочетании с эластичностью при рабочих температурах от –196 °С до 400 ... 450 °С, не выделяя дыма или газа. В условиях вибрации и высоких температур не выделяют мелкодисперсную пыль, являются основой перспективных размеростабильных, органических композитов для изделий специального назначения, которые обеспечивают комплекс высоких упруго-механических показателей наряду с огнезащищенностью. Предложенное решение ограничено чрезвычайно высокой себестоимостью опытно-промышленного выпуска нитей и волокон [3, 4].

Разработка конструкторских решений предпринята в [5]. Техническое решение имело эффект повышения эквивалентной теплопроводности до 40% относительно базовой теплопроводности смолы. Данное направление совершенствования изоляции будет всегда актуальным.

В [6] представлена слюдяная лента, состоящая из слюдяного и одного или нескольких тканевых слоев, пропитанных смолой. Особенностью данной ленты является то, что для ткани используются нити из нескрученных стекловолокон, благодаря чему она получается более тонкой при сохранении прочности, свойственной тканям из нескрученных волокон. Толщина стеклоткани может составлять от 14 до 250 мкм, как правило от 20 до 125 мкм. Толщина слюдяного слоя находится в интервале от 50 до 250 мкм, преимущественно до 150 мкм в случае, когда композит используется для основной изоляции.

Для пропитки подходят термоусадочные эпоксидные смолы, в особенности эпоксидные фенольные новолачные смолы, бутадиеновые смолы, полиэфир, силиконы, бисмалеоимиды и цианатные эфиры. Предпочтительно использование эпоксидных смол: бис(3,4-эпокси-6-метил-циклогексилметил) адипинат, винилциклогексан диоксид или глицидные эфиры полифенольной эпоксидной смолы, такой как бисфенол диглицидил-эфирная эпоксидная смола, фенолформальдегидная новолачная полиглицидилэфирная эпоксидная смола, эпоксикрезольные новолаки или их смеси. Смола содержится в ленте количестве от 3 до 25 массовых процентов, в основном — от 5% до 18%.

Зарекомендовавшим свое применение решением является повышение коэффициента теплопроводности путем введения в связующее вещество высокотеплопроводных мелкодисперсных неорганических диэлектрических частиц [7–19]. Данный способ имеет потенциал повышения теплопроводности свыше 100% и не требует изменения принципиальной конструкции изоляции. Высокое значение эффективной теплопроводности изоляции статорного паза, главным образом определяется теплопроводностью материала корпусной изоляции. Повышение теплопроводности корпусной изоляционной ленты, предназначенной для изготовления статорной обмотки мощных электрических машин, обеспечивается благодаря введению в слюдосодержащие композиции предварительно химически модифицированных наполнителей полифракционного состава, в частности, нано-, мезо- и микроразмерных частиц. Выбор наполнителя для повышения теплопроводности является важной задачей. В зависимости от назначения композитного материала, к наполнителю в соответствии с задачей будет предъявлен ряд требований. Не всегда можно соблюсти все требования, поэтому следует искать компромисс, в виде сочетания наиболее важных характеристик наполнителя, как например, высокая теплопроводность, высокая электроизоляционная способность, совместимость наполнителя с материалом матрицы, низкая стоимость, не токсичность, химическая стабильность (неизменность свойств), высокая смачиваемость.

Наиболее широко в промышленности для целей изготовления электрической высоковольтной слюдосодержащей изоляционной ленты используются два типа дисперсных неметаллических порошков: оксид алюминия Al_2O_3 ($\lambda = 25\text{--}40$ Вт/(м·К)) и гексагональный нитрид бора BN ($\lambda = 40\text{--}120$ Вт/(м·К)) [7].

Теплопроводные полимерные материалы, пропиточные лаки, электроизоляционные ленты, обладающие диэлектрическими свойствами, наполненные частицами Al_2O_3

В работе [10] исследовано влияние концентрации частиц Al_2O_3 в силиконе на эффективную теплопроводность композита, произведена оценка распределения частиц и степени их влияния. Итогом исследования является заключение, что для получения теплопроводящих диэлектрических покрытий с теплопроводностью выше 1 Вт/(м·К) могут быть применены крупнодисперсные ($d > 40$ мкм) и среднелдисперсные ($10 \text{ мкм} < d < 40 \text{ мкм}$), предварительно обработанные порошки во избежание образования агломераций.

Авторы [20] приводят данные, описывающие получаемые эффективные характеристики при введении наночастиц в полимерную матрицу. Такие полимерные композиции обладают повышенной объемной теплопроводностью, а также низким тепловым сопротивлением в контакте с поверхностями, от которых отводится тепло. Кроме того, составы с наночастицами обладают меньшим фазовым разделением, чем составы с частицами микронного размера. В качестве органического связующего можно использовать полидиметилсилоксановые смолы, эпоксидные смолы, акрилатные смолы, другие органо-функционализированные полисилоксановые смолы, фторированные смолы и другие полимеры. Предлагается использовать наночастицы кремнезема, полиэдрального олигомерного силсесквиоксана (POSS – добавки), наноразмерные оксиды металлов (например, Al, Ti), BN или AlN, либо наночастицы самих металлов (серебро, золото, или медь). Размер частиц наполнителя находится в интервале от 1 нм до 250 нм, в основном – от 5 нм до 150 нм. Наночастицы могут быть просто диспергированы в матрице, либо иметь ковалентные связи с ней, что позволяет улучшить их совместимость. Выбор функциональных групп, наносимых на поверхность частиц, зависит как от природы полимера, так и от состава самих частиц. Функциональные группы могут быть алкильными, эпоксидными, гидридными, гидроксильными и другими. Для облегчения введения наночастиц в полимер они могут находиться в виде суспензии, содержащей от 20 до 50 процентов сухого остатка. Композиция также может содержать наполнители микронной дисперсности, например, кремний в различных модификациях, технический углерод, графит, алмаз, различные металлы (Ag, Au, Al, Cu), SiC, BN или AlN, оксиды металлов (Al, Zn, Ti, Fe) или их комбинации. Количество наполнителя микронного размера может колебаться от 10 (чаще от 20) до 90 процентов.

Однако, к связующим веществам, применяемым с целью изготовления высоковольтных электроизоляционных материалов, предъявляют особые требования, в перечень которых входит такой параметр, как вязкость. Объемная концентрация вводимых частицы в связующее вещество ограничена 30–35% с целью сохранения технологичности.

В [21] автором обнаружено, что можно добиться создания химических связей между частицами и матрицей-полимером, в который он вводится путем изменения химического состава поверхности частиц. Обработанные частицы могут быть введены в мономеры бензоксазина, эпоксидных смол и новолаков или фенольных смол резольного типа. Процесс сопровождается полимеризацией и формированием полимерной композиции. Возникновение химических связей между полимером и функциональными группами на поверхности частиц уменьшает вязкость получаемой композиции, благодаря чему появляется возможность добавлять большее количество высокотеплопроводного наполнителя, а значит добиваться больших значений теплопроводности наполненного полимера.

Аналогично вышепредставленной работе, в [22] решается проблема низкой вязкости компаунда после введения большого количества частиц-наполнителей. Предлагаемое решение заключается в покрытии частиц неионным поверхностно-активным веществом (ПАВ), и к формовочному компаунду, обладающему высокой теплопроводностью. Наилучших показателей теплопроводности удалось добиться при использовании порошка с размером частиц от 20 до 80 мкм и средним размером около 50 мкм. Выяснилось, что при использовании определенных ПАВ для предварительной обработки поверхности частиц BN можно добиться меньшей вязкости композиции, что позволяет добавлять большее количество наполнителя (в данном случае до 60 весовых процентов), а значит, добиваться большей теплопроводности наполненного полимера. В качестве неионных ПАВ выбираются вещества из классов амидов и сложных эфиров. В качестве связующего в композиции использовалась смесь эпоксидно-крезольного новолака и фенольного новолака.

В [23] представлена теплопроводная композиция, включающая и диэлектрические частицы микронного размера, и электропроводные наночастицы, смешанные с полимерной матрицей.

Несмотря на содержание электропроводных частиц, теплопроводный материал в соответствии с данным изобретением не является электропроводящим. Полимер, содержащий неэлектропроводные частицы микронного размера и электропроводные наночастицы, обладает большей теплопроводностью, чем полимер только с диэлектрическими частицами микронного размера. То есть наночастицы увеличивают объемную теплопроводность, при этом сохраняя вязкость, что делает композицию более технологичной. В качестве органической матрицы могут быть использованы различные смолы, в том числе эпоксидные.

В качестве наполнителя микронного размера предлагается использовать SiO_2 , аморфный кремнезем, технический углерод, графит, алмаз, $\text{Al}(\text{OH})_3$, BN или AlN, кремнезем, покрытый нитридом алюминия, оксиды металлов и их комбинации. Размер частиц находится в диапазоне от 1 до 100 мкм, как правило, от 10 до 50 мкм. Электропроводные наночастицы, добавляемые в матрицу, — металлы (медь, серебро, золото, палладий, платина), графит или полупроводники. Размер частиц — от 1 до 250 нм, в основном — от 10 до 100 нм. В тех областях, где частицы микронного размера находятся в непосредственной близости друг от друга, наноразмерные частицы позволяют осуществить термический контакт между ними. Причем, так как частицы микронного размера являются диэлектриками, не возникает путей для прохождения электрического тока. Количество электропроводного наполнителя подбирается таким образом, чтобы электропроводность системы не превысила значение, необходимое для конкретного случая. Использование электропроводных наночастиц выгодно, потому что они, как правило, обладают большей теплопроводностью, чем диэлектрические наночастицы.

Для облегчения диспергирования наполнителей в матрице можно использовать растворители, такие как изопропанол, 1-метокси-2-пропанол, 1-метокси-2-пропил ацетат, толуол, ксилол, N-метил пирролидон, дихлорбензол и их комбинации. В процессе приготовления композиция может быть подвергнута вакуумированию (от 0,5 до 250 мм рт. ст.) при температуре от 20 °C до 140 °C.

Также, композиция может содержать отвердитель (для эпоксидной смолы), ингибитор отверждения (для увеличения срока годности), наноразмерные неэлектропроводные частицы (оксиды металлов, AlN и BN), которые могут быть функционализированы для улучшения их интеграции в матрице. В работе также показан принцип, согласно которому комбинируется введение нано- и микрочастиц. В тех областях, где частицы микронного размера находятся в непосредственной близости друг от друга, наноразмерные частицы позволяют осуществить термический контакт между ними, формируя “высокотеплопроводные мостики”. Результаты исследований свидетельствуют о важности фракционного состава и размерности частиц-наполнителя.

[11] применена химическая модификация поверхности наполнителей при исследовании их электрофизических, термических и механических свойств. Химическая обработка поверхности частиц зачастую направлена на повышение смачиваемости, а эффект от проведения процедуры проявляется в виде увеличения степени наполнения матрицы полимера. Выбор типа химической обработки зависит как от природы полимера, так и от состава самих частиц. Конкретная группа частиц требует индивидуальной разработки процедур модификации поверхности частиц, а именно химической, термической и т.п.

Известны данные, свидетельствующие о формировании ориентированных неорганических высокотеплопроводных частиц по направлению теплового потока «мезо-групп» в химической структуре полимерных пропитывающих компаундов и использование связующего вещества/полимера с повышенной структурной организацией [25]. Структурированные системы обеспечивают лучшее распространение фононов в материале и кроме того в них может происходить более равномерное распределение наполнителей и лучшее связывание их поверхности с полимерными молекулами за счет снижения пространственных препятствий.

В [12, 25] описан принцип создания ориентированной на молекулярном уровне химической структуры, позволяющей создавать ориентированные структуры, по которым распространяется

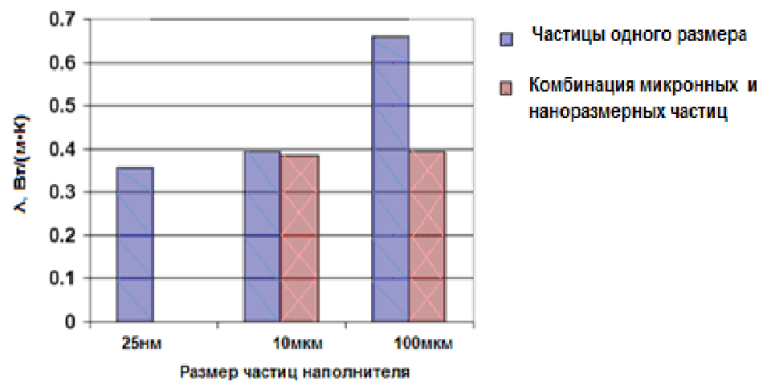


Рис. 1. Значения λ эпоксидного компаунда, наполненного частицами Al_2O_3 различных размеров [26]

Fig. 1. λ values for an epoxy compound filled with Al_2O_3 particles of various sizes [26]

тепловой поток. За основу взята химическая структура бисфенольной эпоксидной смолы. Отмечено, что коэффициент теплопроводности таких ориентированных материалов может достигать 10 Вт/(м·К). Ориентированные структуры можно получать также за счет механической прессовки вытянутых наполнителей, имитируя образование теплопроводных мостиков.

[26] показано, что при введении в состав смеси эпоксидного компаунда (Shell Chemical (США) 50 масс. % порошка Al_2O_3 трех различных размеров без химической модификации поверхности наполнителя, а также комбинации микро- и наноразмерных наполнителей без изменения общего процентного содержания наполнителя, значения λ эпоксидного компаунда растут при переходе от нано к микроразмерному наполнителю.

При замене половины частиц Al_2O_3 размером 100 мкм в эпоксидном компаунде на частицы размером 25 нм, происходит значительное снижение эффективной теплопроводности. Это может быть связано с уменьшением количества крупных частиц высокотеплопроводного наполнителя, необходимых для создания теплопроводящего кластера.

Сравнительный анализ технических характеристик теплопроводных композитных материалов, наполненных частицами Al_2O_3 и BN

Практический интерес представляют данные, полученные в работе [14]. Экспериментально продемонстрировано влияние нано – мезо – и микрочастиц на эффективную теплопроводность композита при различных концентрациях вносимых различных включений. Продemonстрировано, что в вопросе повышения эффективной теплопроводности применение BN эффективнее, чем Al_2O_3 ввиду большей теплопроводности первого. Не раскрыт вопрос хаотичного распределения множества частиц и влияния применения частиц на электрофизические свойства.

В [27] выполнено исследование влияния свойств компонентов полимерных композитных материалов на эффективную теплопроводность, в частности, рассмотрены следующие вопросы: какой вклад в эффективную теплопроводность полимерного композитного материала оказывает теплопроводность микронаполнителей, объемная концентрация, форма и ориентация наполнителя по отношению к тепловому потоку. При объемной концентрации наполнителя равной 30%, повышение теплопроводности вводимых частиц в полимерный материал имеет практический смысл до значений 40 – 100 Вт/(м·К) и значительно зависит от размерности, формы, ориентации, распределения и фракционного состава частиц.

Таким образом, можно сделать вывод, что разница в применении между введением в эпоксидный компаунд микрочастиц BN и Al_2O_3 не существенна с точки зрения теплопроводности при одинаковой концентрации, форме частиц, их обработке (химической, термической, механической) и матрице.

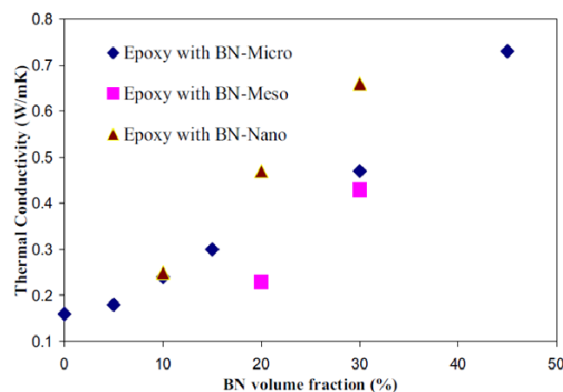


Рис. 2. Теплопроводность эпоксидных композитов с нано / мезо / икпоразмерными частицами BN

Fig. 2. Thermal conductivity of epoxy composites with nano / meso / micro-sized particles BN

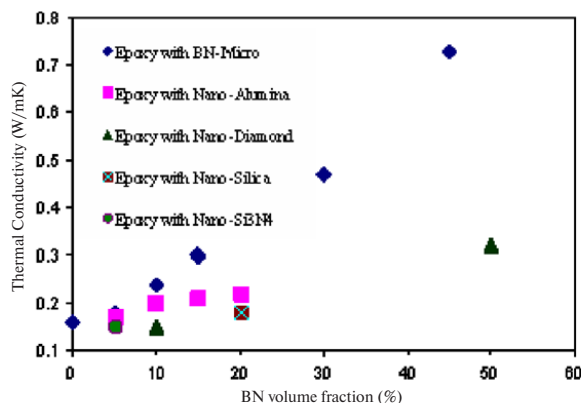


Рис. 3. Теплопроводность эпоксидных композитов, наполненных микро- BN, нано- Al_2O_3 , наноалмазами, нано- SiC и наноаморфными частицами Si_3N_4

Fig. 3. Thermal conductivity of epoxy composites filled with micro- BN, nano- Al_2O_3 , nanodiamonds, nano- SiC and nanoamorphous particles Si_3N_4

Увеличение теплопроводности композиционного материала вполне предсказуемо с введением большей концентрации частиц-наполнителя, в то время, как изменение электрофизических свойств получаемого материала, прогнозировать не всегда удается и результатом является снижение электроизоляционной способности, снижение электрической прочности, снижение нагревостойкости, а чрезмерное повышение концентрации частиц в связующем веществе сопровождается повышенной жесткостью и низкой механической прочностью композиции, что ограничивает возможности изготовления изоляции на основе высоконаполненного частицами связующего вещества.

В [15] приведено сравнение BN и Al_2O_3 в части глубины эрозии при различном наполнении компаунда. Для высоких концентраций наполнителя (40–80%) микронных размеров наблюдается эффект уменьшения кратковременной электрической прочности эпоксидного компаунда, тем не менее при этом имеет место снижение глубины эрозии при поверхностных частичных разрядов. Однако столь высокие концентрации наполнителя недопустимы для высоковольтной электрической изоляции ввиду ухудшения ее механических и технологических свойств.

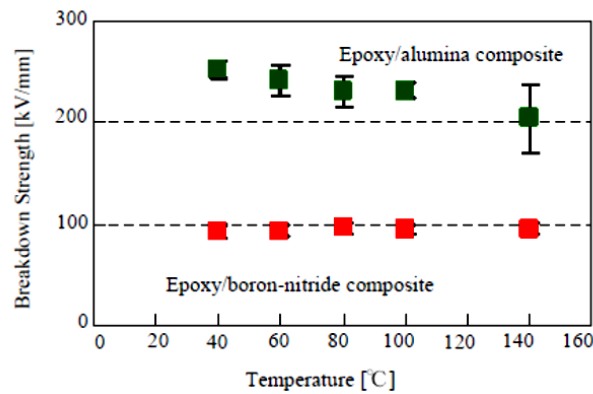


Рис. 4. [15]

Fig. 4. [15]

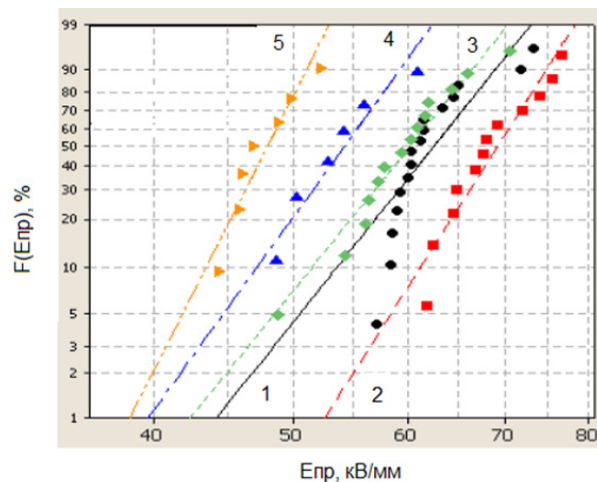


Рис. 5. Распределение электрической прочности наполненного частицами Al_2O_3 эпоксидного компаунда (размер частиц 20 нм и 5 мкм) (1 – чистый эпоксидный компаунд, 2 – 5 масс % наночастиц Al_2O_3 , 3 – 10 масс % наночастиц Al_2O_3 , 4 – 15 масс % наночастиц Al_2O_3 , 5 – 10 масс % микрочастиц Al_2O_3 , толщина образцов 0,5 мм, электродная система: 2 цилиндрических электрода, с радиусом закругления 3,2 мм, среда – трансформаторное масло, скорость подъема переменного напряжения (60Гц) – 0,5 кВ/мм)

Fig. 5. Distribution of the dielectric strength of an epoxy compound filled with Al_2O_3 particles (particle size 20 nm and 5 μm) (1 – pure epoxy compound, 2 – 5 wt% Al_2O_3 nanoparticles, 3 – 10 wt% Al_2O_3 nanoparticles, 4 – 15 wt% Al_2O_3 nanoparticles, 5 – 10 wt% Al_2O_3 microparticles, sample thickness 0.5 mm, electrode system: 2 cylindrical electrodes, with a radius of 3.2 mm, medium – transformer oil, AC voltage rise rate (60Hz) – 0.5 kV/mm)

Так для соединения BN наблюдается следующая картина. Введение незначительных концентраций ($< 1\%$) BN приводит к увеличению длительной электрической прочности, однако дальнейшее увеличение концентрации (5%) дает отрицательный эффект. В случае применения Al_2O_3 , даже при незначительных концентрациях нанонаполнителя ($< 1\%$) наблюдается снижение электрической прочности наполненного эпоксидного компаунда, в то время как 5% концентрация приводит к увеличению электрической прочности. Данные справедливы для указанных концентраций нанонаполнителей Al_2O_3 [16–18]. Дальнейшее увеличение процентного содержания наночастиц до 10 масс % и более, приводит к снижению $E_{\text{пр}}$ относительно чистого эпоксидного компаунда в связи с образованием агломерацией наночастиц [19].

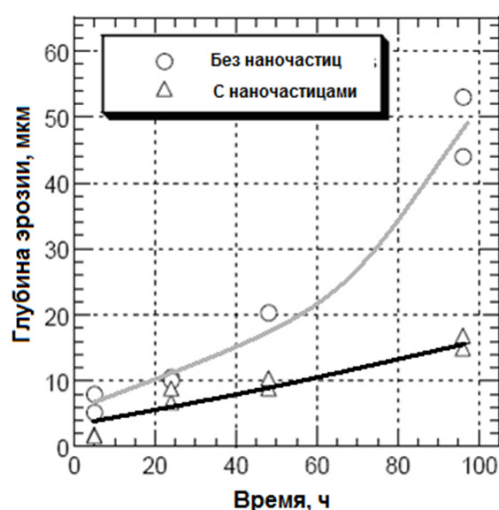


Рис. 6. Зависимость глубины эрозии при ЧР эпоксидного компаунда от времени приложения испытательного напряжения

Fig. 6. Dependence of the erosion depth at PD of the epoxy compound on the time of application of the test voltage

Вместе с тем, существует большое количество работ [28–32], авторы которых считают, что возможным путем улучшения электрической прочности наполненных полимеров служит введение в полимерную матрицу одновременно с микронаполнителями наноразмерных наполнителей. Использование в качестве наполнителя наночастиц Al_2O_3 (7 нм), приводит к увеличению $E_{\text{пр}}$ (60 Гц) с 190 кВ/мм для чистого эпоксидного компаунда до 210 кВ/мм для наполненного компаунда (при содержании наночастиц Al_2O_3 – 5 масс %).

При введении в состав эпоксидной смолы (CY 1300, Huntsman (США)) наночастиц Al_2O_3 с размером 40 нм и плотностью 4 г/см³ (компании Sigma-Aldrich, США) на плоских образцах были получены значения электрической прочности, представленные в табл. 1 [33].

Таблица 1

Значения электрической прочности наполненного наночастицами Al_2O_3 эпоксидного компаунда [34]

Table 1

Values of dielectric strength of epoxy compound filled with Al_2O_3 nanoparticles [34]

Толщина образца (мм)	$E_{\text{пр}63\%}$ кВ/мм			
	Чистый компаунд	Содержание наночастиц Al_2O_3 масс %		
		0,10	1,00	5,00
0,5	63,47	58,74	59,86	70,72
1,0	40,16	36,37	38,61	42,77
3,0	19,67	18,13	19,07	20,15

Как видно, при содержании 0,1 масс % наночастиц в объеме полимерной матрицы, происходит снижение $E_{\text{пр}}$ ниже значения $E_{\text{пр}}$ для чистого компаунда. Авторы [35] связывают это с недостаточной концентрацией нано частиц в объеме полимера, при которой расстояние между соседними частицами намного превышает их размер. С дальнейшим увеличением процентного содержания Al_2O_3 (до 1 масс %) наблюдается незначительное увеличение $E_{\text{пр}}$. По мнению авторов [36], при малых концентрациях частицы наполнителя действуют как дефекты, однако в случае

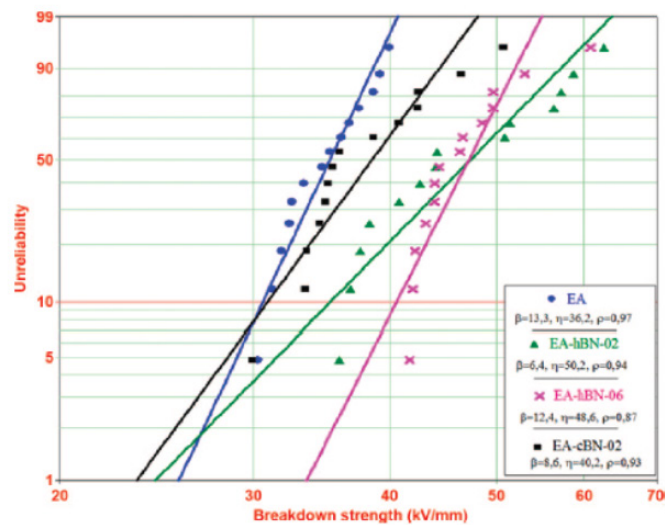
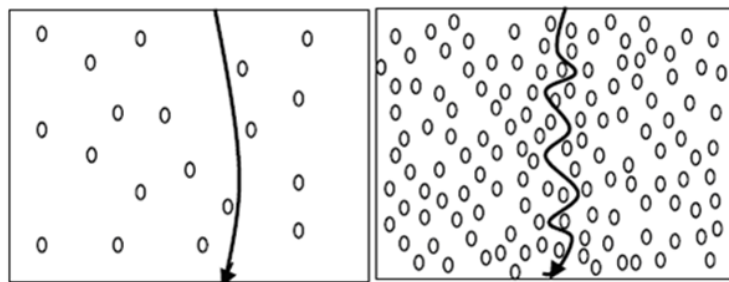


Рис. 7. [19]

Fig. 7. [19]

Рис. 8. Формирование канала пробоя в наполненном наночастицами Al_2O_3 эпоксидном компаунде (а – содержание наполнителя 0,1 масс %, б – содержание наполнителя 5 масс %) [34]Fig. 8. Formation of a breakdown channel in an epoxy compound filled with Al_2O_3 nanoparticles (a – filler content 0.1 wt%, b – filler content 5 wt%) [34]

1 масс % количество наночастиц становится достаточным для вступления в силу эффекта взаимодействия наночастиц с полимерной матрицей. При этом наночастицы Al_2O_3 выступают в качестве барьеров для носителей электрического заряда при их прохождении через объем полимера [34]. Увеличение содержания наполнителя до 5 масс % (при этом расстояние между частицами сокращается до 100 нм), привело к увеличению $E_{\text{пр}}$ (с 59,68 до 70,72 кВ/мм).

Некоторые авторы [37] отмечают, что введение одновременно микро- и наночастиц в состав эпоксидного компаунда способно уменьшить глубину эрозии при ЧР, а также положительно повлиять на электрическую прочность композиционного материала. Также представляют интерес результаты работ, в которых оценивается эффект от одновременного внедрения Al_2O_3 (как основного микроразмерного наполнителя) и BN (как дополнительного наноразмерного компонента).

Теплопроводные полимерные материалы, пропиточные лаки, электроизоляционные ленты, обладающие диэлектрическими свойствами, наполненные сочетанием частиц Al_2O_3 и BN

В [38] отмечается, что при введении в состав эпоксидного компаунда двух типов высокотеплопроводных наполнителей (Al_2O_3 и гексагонального BN) при содержании 25 масс %, значения λ наполненного компаунда составляют 0,65 и 0,95 Вт/(м·К) соответственно.

В [39] предлагается рассмотреть разработанный способ синтеза полиимидной смолы. Смола представляет собой полиаминовую кислоту, которая наполнена наноразмерным порошковым наполнителем. Наполнитель является сочетанием трех теплопроводящих частиц, таких как Al_2O_3 , BN и AlN, содержание наполнителя составляет 10–30% от общего количества смолы. Синтезированная особым способом смола, наполненная порошковыми наполнителями, позволяет получить коэффициент эквивалентной теплопроводности более чем в три раза выше коэффициента теплопроводности обычной полиимидной смолы, обеспечивая превосходные электрофизические, тепловые и механические свойства. Срок хранения получаемого композита также может быть существенно улучшен.

Аналогично вышепредставленному изобретению, [40] описывает способ получения высоко-теплопроводного композита. В состав описанного композита входит 40–45% эпоксидной смолы (бисфенол А), 30–35% модифицированного теплопроводящего наполнителя Al_2O_3 и BN, 20–25% растворителя, ацетона или толуола, 2–3% отвердителя (ангидрид кислоты или имидазол), 1–2% ускорителя (разбавителя). Результатом четкого следования описанных стадий изготовления композита является продукт с теплопроводностью 11,4 Вт/(м·К) и вязкостью менее 139,0 сП. Изобретение [41] также описывает способ получения и применения композитных материалов, содержащих наночастицы TiO_2 , ZrO_2 , ZnO, SiO_2 , Al_2O_3 , Pt, Au, Ag или Cu, совместно с t-BN. Область применения связана, в частности, с теплообменными жидкостями. [42] описывает способ получения электроизоляционного материала с отличными изоляционными свойствами. Электроизоляционный материал содержит: эпоксидную смолу; отвердитель; эластомерные частицы; неорганические частицы и другие добавочные материалы. Авторы предложили решение проблемы снижения прочности и электроизоляционных свойств высоковольтной изоляции ввиду теплового расширения эпоксидной смолы и образования трещин. Решение заключается в применении диэлектрических микрочастиц. Патент раскрывает способ смешивания ультрадисперсных частиц, отвердителя и ускорителя отверждения термореактивных смол друг в друге. Описанный способ обеспечивает достижение превосходных электроизоляционных, теплопроводных и механических свойств получаемого материала. Кроме того, предлагаемый неорганический наполнитель может представлять собой Al_2O_3 , TiO_2 , AlN, BN или их сочетание. Предпочтение отдается частицам, имеющим средний размер 500 мкм или менее.

В [43] отмечается важность фракционного состава и размерности наполнителей. Предполагается применение частиц MgO, Al_2O_3 , BN, AlN или сочетание частиц. Внешний вид внутренней структуры полимерной теплопроводной изоляционной композиции представлен на рис. 10.

Отличительной особенностью разработки, в первую очередь, является разделение фаз смолы — матрицы композитного материала. Размерность наполнителей - от 1 до 100 мкм распределены неравномерно и случайно. 1-ая полимерная фаза — термопластичная смола (полиэфирсульфон), 2-ая полимерная фаза — термореактивная смола (эпоксидная смола). Объемная концентрация крупнодисперсных частиц составляет от 10 до 80%, а мелкодисперсных частиц от 5 до 60%. Эквивалентная теплопроводность получаемого композитного материала составляет 3 Вт/(м·К). Электрофизические свойства и механические свойства не рассматриваются.

Известны данные, описанные разработчиками Китайской компании [44], которые раскрыли способ изготовления микро-нанокompозитного изоляционного материала. Описанный способ включает этапы, связанные с модификацией поверхностей неорганических наночастиц и их диспергирования (химическая, термическая, ультразвуковая обработка). Эпоксидная смола и ее отвержденный продукт, имеют следующие эксплуатационные характеристики: (1) повышенные механические свойства, (2) повышенная адгезия, (3) низкая усадка при отверждении, (4) простота производства, (5) отличная электроизоляционная способность, (6) высокая стабильность; (7) повышенная термостойкость, (8) высокая устойчивость к ультрафиолетовому излучению. Получаемый композит может быть добавлен к полиэпоксидной смоле с целью влияния на про-

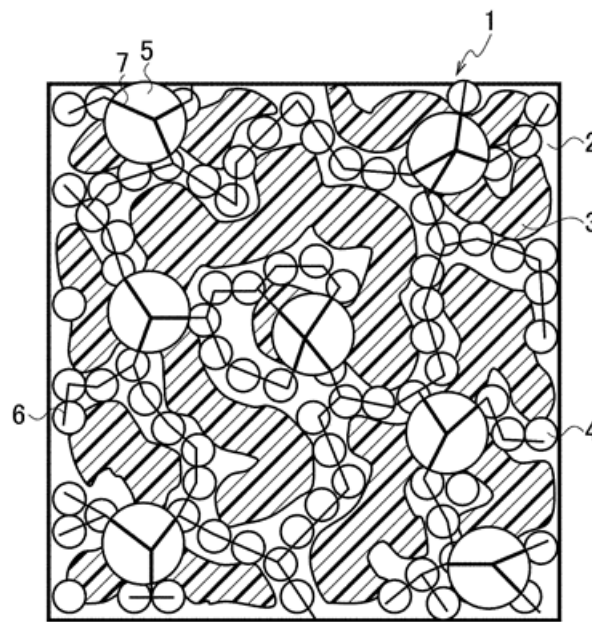


Рис. 9. Полимерная композиция (1); 1-ая полимерная фаза (2); 2-ая полимерная фаза (3); мелкодисперсный неорганический наполнитель (4); крупнодисперсный неорганический наполнитель (5)

Fig. 9. Polymer composition (1); 1st polymer phase (2); 2nd polymer phase (3); finely dispersed inorganic filler (4); coarsely dispersed inorganic filler (5)

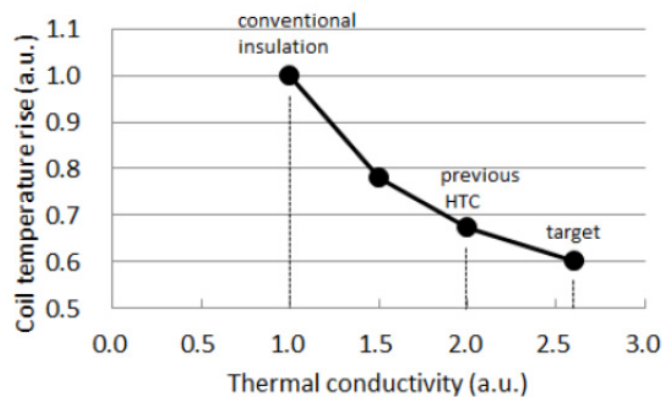


Рис. 10. Данные по теплопроводности изоляции, изготовленной из различных типов лент

Fig. 10. Data on thermal conductivity of insulation, made from various types of tapes

димось образца. Итоговое композитное вещество имеет широкие рыночные перспективы, экономическую ценность и может быть использован при изготовлении литевых и формовочных материалов, применено в качестве покрытий и клея в области военной промышленности, космического судостроения, атомной энергетики, радиоэлектроники и др.

Следующие результаты работ [45] описывает способ получения эпоксидного композиционного материала с низким содержанием наполнителя, высокой теплопроводностью и наличием тройной нано / микроструктуры. Способ получения включает в себя описательную часть в виде пошаговой инструкции каждой стадий модификации поверхностей, совместно вводимых Al_2O_3 и h-BN. Химическая модификация выполняется для получения Al_2O_3 -HBP и BN-HBP. На заклю-

чительной стадии описано, как производить смешивание двух видов частиц в матрице эпоксидной смолы в соответствии с используемой объемной концентрацией. Эпоксидный композитный материал имеет высокий коэффициент теплопроводности, благоприятные механические свойства при сохранении технологических характеристик композиционного материала и при сохранении значительного снижения стоимости.

**Теплопроводные слюдосодержащие электроизоляционные ленты,
наполненные высокотеплопроводными частицами,
обеспечивающие равномерное заполнение конструкции ленты за счет размера использования частиц**

Для корпусной изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин применяются электроизоляционные слюдосодержащие ленты, конструкция которых состоит из слюдяной бумаги (выполняет функцию электроизоляционного барьера), подложки из стеклоткани (обеспечивает механическую прочность композиции), пропиточного компаунда (выполняет функцию связующего вещества и обеспечивает монолитность всей конструкции).

Авторами [46] решается проблема плохой пропитываемости слюдяной бумаги. В нее предлагается добавлять волокна из неорганических веществ (определенные виды стекла). Длина этих волокон должна составлять от 0,5 до 10 мм, а диаметр — от 0,1 до 20 мкм. За счет добавления волокон в слюду увеличиваются пустоты в слюдяной бумаге, которые могут заполняться смолой, таким образом улучшая способность бумаги к пропитке, наполненной диэлектрическими неорганическими высокотеплопроводными частицами. Волокна обладают высокой прочностью, что улучшает механические свойства слюдяной бумаги, и термической стойкостью, благодаря чему в процессе эксплуатации диэлектрическая прочность ленты не ухудшаются. Возможна обработка поверхности волокон ПАВ. В таком случае улучшаются дисперсионные свойства за счет меньшей агломерации волокон, а также улучшается совместимость с пропитывающей смолой благодаря лучшей адгезии. Количество добавляемых волокон составляет от 0,5 до 20 массовых процентов, предпочтительно от 3 до 15 %.

Проблемы возникновения дефектов в структуре стеклянных волокон рассматриваются в [47]. Авторами решается проблема механического разрушения нитей стеклоткани частицами наполнителя в процессах обмотки и прессования путем предварительного покрытия нити ткани жидкотекучей смолой таким образом, чтобы она, создавала защитный слой, не заполняя ячейки ткани.

В [48] описывается лента, в слюдяную бумагу которой еще в процессе изготовления могут быть добавлены наночастицы. Они способны заполнять дефекты в слюдяной бумаге (трещины, складки), тем самым улучшая как теплопроводные, так и диэлектрические характеристики ленты. С другой стороны, частицы могут содержаться в пропитывающей смоле. Это могут быть наночастицы диоксида кремния, оксида алюминия или титана, силикатов, сульфатов, литопона или AlN. Материалы на основе углерода или кремния особенно подходят для данных целей.

В качестве пропитки нежелательно использование бисфенола-*F*, так как наночастицы в такой системе могут быстро агломерировать. Предлагается использовать циклоалифатические эпоксидные смолы, либо силиконовые смолы, причем наночастицы вводятся предварительно в вещество, содержащее эпоксисилановые группы, (в случае циклоалифатических смол), либо в винилсилан (для виниловых смол), которые легко интегрируются в соответствующие смолы. Это позволяет снизить реакционную способность поверхности наночастиц и предотвратить их слипание.

Вместо традиционной слюдяной бумаги в [49] использовали бумагу из стеклянных хлопьев, имеющих толщину от 2 до 4 мкм и ширину от нескольких десятков до тысяч микрон. Авторы предлагают изготавливать из стеклянных хлопьев листы или бумагу, которые в свою очередь можно использовать при производстве изоляционной ленты, полностью заменяя такой бумагой или листом слюдяную бумагу, традиционно используемую в качестве одного из слоев в изоляционной ленте. Подобное усовершенствование должно увеличить теплопроводность ленты,

так как подобная бумага или лист обладают большей теплопроводностью, чем слюдяная бумага. В свою очередь, по мнению авторов, подобная лента должна позволить увеличивать мощность электрооборудования, в котором используется изоляционная лента, а также позволить перейти в некоторых случаях от водяного охлаждения к более экономичному воздушному. Стекланные хлопья могут обладать теплопроводностью от 1 до 1,4 Вт/(м·К) в зависимости от типа используемого стекла, что значительно выше теплопроводности слюды (0,6 Вт/(м·К)). При этом диэлектрическая постоянная слюды и стекланных хлопьев практически одинакова. В процессе изготовления бумаги используется связующее, призванное обеспечить ее высокую механическую прочность. В качестве такового может применяться как термопластичная, так и термореактивная смола.

Фирмой Мицубиси разработана высокотеплопроводная слюдосодержащая лента [50, 51], предназначенная для изолировки электрических катушек и стержней электрических машин. Лента содержит слюдобумагу, стеклоткань и органическое связующее, в которое введен микронный неорганический наполнитель в виде агломерата, размерами больше 10 мкм. Значения теплопроводности ленты не приведены.

Фирма Хитачи разработала высокотеплопроводную слюдосодержащую ленту, состоящую из несущего материала, слоя содержащего частицы BN и связующего; слюдосодержащий слой с частицами слюды. Значение коэффициента теплопроводности такой ленты составляет от 0,4 до 0,6 Вт/(м·К).

Другим важным путем создания высокотеплопроводных материалов является нанесение на поверхность слюдобумаги тонкопленочных покрытий. Фирмой Сименс запатентован высокотеплопроводный материал [53], который состоит из изоляционного материала — подложки и высокотеплопроводного материала, нанесенного на подложку в виде специфического рисунка. В качестве подложки может быть использована слюдобумага, а в виде высокотеплопроводного материала — тонкопленочное алмазное покрытие.

Тошиба разработала высокотеплопроводную изоляцию (для RR-технологии) [54], предназначенная для турбогенератора с водородным охлаждением мощностью 820 МВА. Данные по теплопроводности изоляции, изготовленной из этой ленты, приведены на рис. 10. Можно видеть, что достигнутые значения теплопроводности изоляции из новой ленты составляют 2,6 от обычной.

Приведены также свойства новой изоляции (диэлектрические потери, электрическая прочность). Рецепт НТС-изоляции не представлен.

Фирмой Hitachi (Япония) разработаны два типа высокотеплопроводных лент [55]. Ленты, предварительно пропитанные с теплопроводностью в 2,2 раза превышающие обычную и «сухие» — в 2 раза превышающие обычную.

В работе [56] приведены сведения о новой высокотеплопроводной изоляции (для технологии Resin Rich), разработанной фирмой Мицубиси (Япония) для турбогенератора с водородным охлаждением мощностью 870 МВА. Увеличение теплопроводности по сравнению с традиционной изоляцией продемонстрировано на рис. 11.

Приведены свойства новой изоляции (диэлектрические потери, электрическая прочность, механическая прочность на изгиб). Рецепт и технология изготовления НТС-изоляции не приведены.

В [58] представлена электроизоляционная лента, обладающая двумя проводящими слоями и диэлектрическим теплопроводным электроизоляционным наполненным слоем, который содержит частицы слюды, высокотеплопроводные наполняющие частицы и связующую смолу, находящуюся между проводящими слоями. Отношение объемов частиц слюды и теплопроводных частиц — 1:1, а содержание связующей смолы в диэлектрическом наполненном слое составляет 35–50 объемных процентов. Первый и второй проводящие слои заполнены другой смолой. Однако для лучшей совместимости желательно использовать эпоксидные смолы в каждом из слоев ленты.

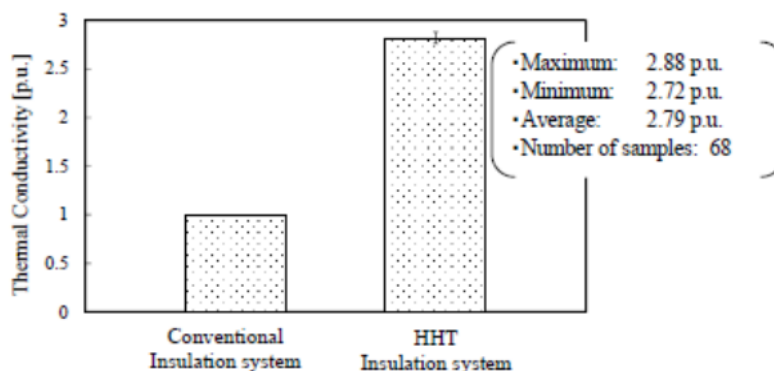


Рис. 11. Сравнительные данные по теплопроводности

Fig. 11. Comparative data on thermal conductivity

Толщина наполненного слоя может составлять от 0,076 до 0,127 мм, стеклосодержащего слоя — от 0,025 до 0,05 мм. Армирующий слой может состоять из таких материалов, как полиэстер, стеклопластик, металлокерамика.

Частицы слюды могут иметь дискообразную или пластинчатую форму. Их диаметр составляет от 10 до 50 мкм. Благодаря своим превосходным диэлектрическим свойствам слюда является ключевым компонентом наполненного слоя. Возможно использование двух видов слюды: $\text{KA}_{12}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ (мусковит) или $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ (флогопит). В качестве связующей смолы могут применяться эпоксидные смолы, полиимидные эпоксидные смолы, жидкокристаллические смолы (обеспечивают большую теплопроводность, чем аморфные). Предпочтительно использование эпоксидных смол бисфенол-А и бисфенол-Ф, являющихся легко коммерчески доступными. Бисфенол-Ф является низковязкой смолой, что позволяет легче заполнять пустоты при пропитывании. Вообще вязкость смол, предложенных в данном патенте, находятся в интервале 100-300 Пуаз. Неорганические частицы наполнителя имеют длину от 1 нм до 100 мкм и отношение длины к ширине — от 5 до 50. Наполненный слой включает частицы из групп нитридов, оксидов и карбидов (Al_2O_3 , AlN , MgO , ZnO , BeO , BN , Si_3N_4 , SiC и SiO_2) или алмазы природного или синтетического происхождения.

Также предлагается предварительно проводить поверхностное модифицирование частиц наполнителя для образования химических связей между ними и смолой. В число подходящих для нанесения на поверхность функциональных групп входят гидроксильные, карбоксильные, аминные, эпоксидные, силановые и виниловые группы.

Возможен вариант, при котором слюдяная лента сначала обматывается вокруг катушки, а потом пропитывается низковязкой смолой методом вакуум-нагнетательной пропитки. После этого смола отверждается при нагревании.

Для сохранения диэлектрических свойств связующего вещества после введения частиц необходимо принимать во внимание тип частиц, форму частиц, размер частиц, гранулометрический состав и вводимое количество частиц в весовых частях. Важную роль играют также конструктивные особенности ленты, поскольку ограничения накладываются заданными геометрическими размерами (толщина и ширина ленты).

В [58] предложена изоляционная слюдяная лента, состоящая из слоя слюды и одного или нескольких слоев тканевого носителя. Ткань образована из волокон стекловолна, причем отношение количества продольных и поперечных волокон в ней больше или равно 2,5:1, благодаря чему ячейки, заполняемые при пропитывании смолой, меньше, чем в обычной стеклоткани. За счет этого количество смолы по отношению к стеклоткани удастся снизить на 50%, что в свою

очередь приводит к увеличению теплопроводности ленты, так как смола обладает наименьшей теплопроводностью в системе.

Крайне интересное техническое решение представлено в [59]. GE представила слоистую изоляцию для электрооборудования, включающую слой полимерного материала, который содержит частицы неорганического противорадиационного вещества. Данный полимерный материал связан со слоистой бумагой. Полученная изоляция может быть использована как лента или обмотка. Изоляционная лента содержит хлопья слюды в том или ином виде. Они обеспечивают изоляционные свойства, в то же время являясь весьма высокотеплопроводными. Проблема возникает в процессе пропитки, когда остаются определенные пустоты, способствующие возникновению коронных разрядов при эксплуатации.

Среди наиболее доступных материалов наполнителей для полимера по мнению авторов, лучше всего подходит Al_2O_3 , обладающий отличными изоляционными свойствами и высокой теплопроводностью. Однако возможно использование и BN, AlN, SiC, либо MgO, Zr, Ti. Авторы также согласны с тем, что влияние наполнителя на свойства полимера во многом зависит от размера его частиц. В данном патенте предлагается использовать частицы со средним размером 0,5 мкм или меньше. Возможно использование таких полимеров как полиэстер, полиэстерамид, полиэстерамидимид, полиамид, полиимид, полиамидимид, поликарбонат, полисульфон, или полиэфир.

[60] описано изобретение, имеющее теплопроводную чувствительную к давлению адгезивную ленту. Раскрыта рецептура изготовления и приведен ряд вариантов осуществления при различном составе композита. Наполнители Al(OH₃), BN, SiC, AlN, Al_2O_3 , Si_3N_4 могут использоваться как по отдельности, так и совместно. Количество теплопроводного материала находится в диапазоне приблизительно 5 – 60 мас. %, предпочтительно 20 – 40 мас.%. Размерность используемых частиц зависит от толщины слоя и находится в диапазоне 0,01–50 мкм. Рекомендуются поверхностная обработка поверхностей наполнителей силаном.

Наиболее оптимальные технические решения скомбинированы в [61] и [62].

Описанный способ в [62] включает этапы, связанные с модификацией поверхностей, вводимых неорганических высокотеплопроводных наполнителей в виде сочетания нано и микрочастиц BN и Al_2O_3 для заполнения пустот и образования теплопроводящих структур и диспергирования частиц (химическая, ультразвуковая обработка) по объему полимерной матрицы с целью получения равномерно распределённых эквивалентных свойств композита. В описанном подходе не применена термическая модификация поверхностей частиц, способная сократить временной интервал, необходимый для процесса подготовки порошков перед введением в жидкую полимерную матрицу.

[61] также комбинирует большую часть выше перечисленных решений, направленных на повышение теплопроводности электроизоляционных материалов и лент путем введения частиц размером от 0,002 мкм до 150 мкм, объемная доля составляет от 50% до 75%. Констатируется, что при объемной доле пластинчатых частиц Al_2O_3 в базовой смоле достигает предпочтительно 70%. При степени объемного наполнения базовой смолы пластинчатыми частицами Al_2O_3 , равной 50% изоляционный материал имеет теплопроводность 0,8 Вт/(м·К). В качестве единственного наполнителя в базовой смоле предусмотрен порошок наполнитель, который по возможности равномерно распределен в базовой смоле. При этом, порошок-наполнитель предпочтительно имеет мономодальное, бимодальное или мультимодальное распределение.

Первой причиной препятствующей получению технического результата является вязкость компаунда. Вводимые частицы можно использовать в связующем веществе в строго ограниченном диапазоне концентраций, чтобы избежать чрезмерного роста вязкости и нетехнологичности композита. После введения частиц концентрации свыше 30 – 35% образуют кластеры, а внутри кластеров образуются воздушные пустоты. Большое количество пустот в изоляции может стать катастрофическим для электрической машины ввиду того, что воздух пробивается

при напряжении ниже рабочего, что приводит к потере безопасности для людей и выходу машины из строя.

Необходимо отметить, что при промышленном использовании высокотеплопроводной наполненной изоляции важным вопросом является оценка значения допустимой рабочей напряженности ($E_{\text{раб}}$) подобной изоляции.

В настоящее время значения рабочей напряженности для наполненной высокотеплопроводной изоляции, изготовленной термопрессованием на предварительно пропитанных электроизоляционных лентах, по экспертной оценке, составляет 2,6 – 2,8 кВ/мм, а для изоляции, изготовленной по технологии вакуум-нагнетательной пропитки на основе непропитанных электроизоляционных лент значение рабочей напряженности составляет приблизительно 2,5 кВ/мм. Увеличение рабочей напряженности наблюдается у изоляции, изготовленной на основе высокотеплопроводных слюдосодержащих лент с оптимизированной структурой без использования наполнителей.

По мнению автора, основной причиной, препятствующей получению заявленного технического результата в [61] является утверждение, что введение наполнителя не ухудшает механических и электрических свойств изоляционного материала, что фактически, является ошибочным. Внедрение частиц сопровождается изменением как термических эквивалентных свойств, так и электрических, механических и технологических свойств. Для того, чтобы связующее вещество было пригодно для использования в целях изготовления высоковольтных электроизоляционных материалов и лент, к разрабатываемым материалам предъявляются особые требования. Требования к частицам обусловлены эксплуатационными условиями, а именно комплексной электротепловой динамической нагрузкой. В свою очередь, требования должны соответствовать техническим условиям.

Тенденции развития объекта исследования

Основными тенденциями развития слюдосодержащих лент, направленных на повышение эквивалентной теплопроводности с сохранением электроизоляционных и механических свойств композитных лент, являются:

1. Введение в матрицу полимерных материалов и лаков неорганических высокотеплопроводных наполнителей специальной формы и размеров (BN, Al_2O_3 , ALN, MgO, BeO и других соединений). Представляется перспективным использование наполнителей вытянутой формы и в форме пластин в силу специфики свойств и применяемых современных технологий. Наиболее широко в промышленности для целей изготовления электрической высоковольтной слюдосодержащей высокотеплопроводной изоляционной ленты используются тонкодисперсные неметаллические порошки электротехнической сажи, Al_2O_3 и гексагональный BN.
2. Включение в гранулометрический состав мелко- и крупнодисперсных наполнителей для заполнения пустот с целью повышения электрической прочности и формирования теплопроводящих структур.
3. Формирование ориентированных неорганических высокотеплопроводных наполнителей по направлению теплового потока «мезо-групп» в химической структуре полимерных пропитывающих компаундов.
4. Применение методов диспергирования частиц по объему связующего вещества с целью получения равномерно распределенных эквивалентных свойств композитного материала.
5. Использование связующего вещества/полимерного материала с повышенной структурной организацией. Реализация данного решения позволит увеличить допустимые рабочие температуры путем замены компонентов (слюдобумаги и/или стеклянной подложки) корпусной изоляционной ленты на пара-aramидные волокна.
6. Уменьшение количества пропитки в ленте благодаря применению специализированной стеклоткани, имеющей большее соотношения продольных и поперечных нитей в стеклоткани.

Эффект — уменьшения размеров ячеек, заполняемых связующим. Также возможно применять стеклоткань с меньшей толщиной за счет использования нитей из нескрученных волокон.

7. Введение наполнителей размерностью менее размера пор применяемой слюдобумаги, которая способна создать дополнительную возможность большей пропитки ленты компаундом, наполненным высокотеплопроводными частицами. Для лучшей пропитки слюдяной бумаги предполагается добавлять волокна стеклоткани для образования пустот, а пустоты наполнять высокотеплопроводным связующим веществом.

8. Использование для изготовления изоляционной ленты особой бумаги из стеклянных хлопьев вместо традиционной слюдяной бумаги.

9. Повышение теплопроводности электроизоляционных лент за счет использования тонкопленочных высокотеплопроводных покрытий, наносимых на стеклоткань.

10. Применение модификации поверхности наполнителя путем химической или термической обработки для повышения совместимости материала наполнителя и матрицы. Модификация поверхности наполнителя способствует уменьшению вязкости композита, что позволяет использовать большее значение концентрации высокотеплопроводных наполнителей в веществе. Предпочтение отдается сферическим частицам ввиду возможности проведения наиболее эффективно процедуры модификации поверхности. При разработке новых композитных диэлектрических высокотеплопроводных композитных материалов рекомендуется уделить особое внимание технологиям:

- i. гомогенизации высоконаполненного состава связующего вещества;
- ii. модификации поверхности частиц путем проведения термообработки;
- iii. пропитки лент компаундом высоконаполненным сочетанием микро и наночастиц Al_2O_3 и BN;
- iv. сушки и намотки лент;
- v. оптимизации, как состава, так и конструкции слюдосодержащей ленты.

Техническим результатом, обеспечиваемым приведенной совокупностью признаков, является повышение теплофизических, сохранение технологических, электрических и механических характеристик композиционного материала после введения микро- и наночастиц наполнителя в соответствии с основными показателями электроизоляционной ленты.

Заключение

В результате проведенного обзора выявлено:

1. Частицы Al_2O_3 наряду с частицами BN имеют наиболее широкое распространение с целью использования для повышения теплопроводности полимерных материалов и пропиточных лаков, обладающих диэлектрическими свойствами. Применяются частицы пластинчатой и вытянутой формы, которые могут быть ориентированы по тепловому потоку с помощью специализированных технологий, обеспечивающих также равномерное заполнение полимерной матрицы. С целью образования теплопроводящих структур используются сочетания микро и наноразмерных частиц. Применение мономодального фракционного состава в виде наноразмерных частиц Al_2O_3 снижает эффект возможностей повышения теплопроводности композита.

В дополнение, по научным данным известно, что введение микро и наноразмерных частиц Al_2O_3 при определенных концентрациях позволяет обеспечить увеличение электрической прочности наполненных полимерных материалов за счет блокирования канала электрического разряда.

2. Сравнительный анализ характеристик полимерных материалов, наполненных частицами Al_2O_3 и BN показал:

— возможности повышения эквивалентной теплопроводности диэлектрических полимерных материалов при их наполнении частицами BN более эффективно, чем Al_2O_3 , с учетом идентично применяемых технических решений;

— характер изменения эквивалентных диэлектрических свойств материалов, наполненных частицами Al_2O_3 или BN неоднозначен и носит нелинейный многофакторный характер, который зависит от концентрации частиц, их размеров, формы и т.д.;

— применение Al_2O_3 позволяет обеспечить снижение стоимостных параметров наполненных полимеров, за счет более низкой стоимости материала по сравнению с BN при использовании сопоставимых технических решений.

3. Для обеспечения повышения теплопроводности полимерных материалов с сохранением достаточных диэлектрических характеристик применяют наполнение полимеров сочетанием микро и наноразмерных частиц Al_2O_3 и BN. Такое техническое решение обеспечивает достижение удовлетворительных теплофизических и высоких электрофизических свойств путем заполнения воздушных пустот в полимере, что снижает интенсивность внутренних частичных разрядов и замедляет процессы развития дефектов. Также подтверждено, что сочетание частиц способно уменьшить глубину эрозии при частичных разрядах, положительно повлиять на электрическую прочность композитного материала. При определенных сочетаниях концентрации частиц Al_2O_3 и BN возможно повышение эквивалентных электрофизических и термомеханических свойств композита.

4. Выявлены технические решения, позволяющие обеспечить дополнительное повышение теплопроводности электроизоляционных лент за счет введения в конструкцию слюдяной бумаги высокотеплопроводных частиц размерностью менее размера пор слюдобумаги. Частицы могут вводиться как на стадии изготовления слюдобумаги, так и на стадии пропитки ленты или готовой изоляции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Теплопроводность системы изоляции статорной обмотки мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением / Азизов А.Ш., Андреев А.М., Костельов А.М., Поликарпов Ю.И. // Электротехника № 3 2009, С. 26–28.

[2] **Tari M., Yoshida K., Sekito S., Allison J., Brutsch R., Lutz A.** A high voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo generators // Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference. Indianapolis, Indiana, USA, IEEE. 23–25 Sept. 2003. P. 2.

[3] Основные направления и концепции развития производства и модификации отечественных химических волокон / Н.П. Пророкова, М.Г. Киселев, Д.Н. Клепиков // Вестник химической промышленности. 2018. НИИТЭХИМ URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/osnovnye-napravleniya-i-kontseptsii-razvitiya-proizvodstva-i-modifikatsii-otechestvennykh-khimicheskikh-volokon> (дата обращения: 20.08.2020).

[4] Полиимидные и арамидные волокна и нити со специальными свойствами и изделия на их основе / Мусина Т.К., Волохина А.В., Щетинин А.М., Оприц З.Г., Ивашова В.А., Кия-Оглу В.Н., Педченко Н.В. // В мире оборудования. — 2010. — № 2 (9). — С. 4–8.

[5] Impact of new motor and generator insulation systems / P. Marek, F. Senn, W. Grubelnik, W. Ladstetter // energize — November 2007 — Pp. 51–55.

[6] Патент RU2332736 Материал изоляционной ленты, способ его изготовления и применение / Эдер Ф., Греспель П., Прайбиш М., Рор К. Сименс Акциенгезелльшафт. Номер заявки: 2014149116, 2013.04.04 (Дата публикации: 2017.01.19)

[7] **Ngo I.L., Byon C.** Thermal conductivity of particle-filled polymers // Polymer Science Book Series. No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. A. MéndezVilas, A. Solano (Eds.). Badajoz, Spain: Formatex Research Center, 2016. Pp. 554–565.

- [8] **Mishra D., Satapathy A.** A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.
- [9] **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song.** Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y
- [10] **Михеев В.А., Сулаберидзе В.Ш.** Расчетноэкспериментальные исследования эффективной теплопроводности композиционных материалов на основе полимеров // Мир измерений. 2017. № 3. С. 26–28.
- [11] **Choudhury M., Mohanty S., Nayak K., Aphale R.** Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites // Journal of Minerals and Materials. Characterization and Engineering. 2012. Vol. 11. No. 7. Pp. 744–756.
- [12] **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon.** Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.
- [13] **Reine B., Di-Tomaso J., Dusserre G., Olivier P.A.** Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.
- [14] **Han Z., Wood J.W., Herman H., Zhang C., Stevens G.C.** Thermal properties of composites filled with different fillers // Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, BC, Canada. 9–12 June, 2008. Pp. 499–501.
- [15] Effects of Nano-Filler Addition on Partial Discharge Resistance and Dielectric Breakdown Strength of Micro- Al_2O_3 /Epoxy Composite / Li K. Okamoto et.al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, 2010. P. 654–663.
- [16] The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites / H. Jin, I. A. Tsekmes, J. Wu, A. R. Mor and J. Smit // 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017, pp. 141–143.
- [17] Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties / Toshikatsu Tanaka // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. – P. 914–928.
- [18] AC Breakdown Characteristics of Epoxy Nanocomposites / P. Preetha, M.J. Thomas // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18, No. 5. October 2011. Pp. 1526–1534.
- [19] Enhancing the thermal and electrical performance of epoxy microcomposites with the addition of nanofillers / I.A. Tsekmes, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, R. Kochetov // IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 31, no. 3, pp. 32–42, May-June 2015.
- [20] Патент US2005161210 Organic matrices containing nanomaterials to enhance bulk thermal conductivity. Hong Zhong, Schenectady, NY (US); Slawomir Rubinsztajn, Niskayuna, NY. Номер заявки: 10/426,485 (Дата публикации: 2003-04-03)
- [21] Патент US6160042 Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity polymer based boron nitride composition and method. Hatsuo Ishida, Edison Polymer Innovation Corporation. Номер заявки: 09/164,927 (Дата публикации: 1998-10-01)
- [22] Патент US5681883 Enhanced boron nitride composition and polymer based high thermal conductivity molding compound. Richard Frank Hill; Stephen Phillip DaVanzo. Номер заявки: 610,764 (Дата публикации: 1996-03-05)
- [23] Патент US2005045855 Thermal conductive material utilizing electrically conductive nanoparticles. Tonapi Sandeep Shrikant; Zhong Hong; Simone Davide Louis; Fillion Raymond Albert; Momentive Performance Materials, INC Номер заявки: US20030654391 20030903 (Дата публикации: 2005-03-03)
- [24] Патент EP1766637 Structured resin systems with high thermal conductivity fillers. SIEMENS POWER GENERATION INC. Номер заявки: WO 2006/007385 A1 (Дата публикации: 2006-01-19)

- [25] Development of High Thermal Conductive Laminates / M. Ito (Hikone Factory; Shin-Kobe Electric Machinery Co., Ltd) // Proc. of 2005 International Symp. on Elec. Insul. Kitakyushu, Japan. pp. 10–15.
- [26] Effects of nano-sized particles on electrical and thermal conductivities of polymer composites / Fan L. et.al. // 9th Int. Symposium on Advanced Packaging Materials IEEE 2004. Pp. 193–199.
- [27] Влияние свойств компонентов на эффективную теплопроводность полимерных композитных материалов / Степанов В.В., Петреня Ю.К., Андреев А.М., Костельов А.М., Маннанов Э.Р., Талалов В.А. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 4. С. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408
- [28] Effect of nano-fillers on electrical treeing in epoxy resin subjected to AC voltage / Ding H.Z., Varlow B.R. // IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), 2004. Pp. 332–335.
- [29] Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro- Al_2O_3 /epoxy composite / Okamoto K. et.al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, 2010. Pp. 654–663.
- [30] Epoxy based materials containing micro and nano sized fillers for improved electrical characteristics / Fabiani D. et.al. // IEEE Int'l. Conf. Solid Dielectr.(ICSD), Potsdam, Germany, 2010. Pp. 212–215.
- [31] Evaluation of insulation properties of epoxy resin with nano-scale silica particles / Imai T. et.al. // Intern. Symp. Electr. Insul. Mat (ISEIM), 2005. Pp. 239–242.
- [32] Insulation properties of nano- and micro-filler mixture composites / Imai T. et.al. // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions, 2006 V.13. Issue 2. Pp. 319–326.
- [33] The future of nanodielectrics in the electrical power industry / Cao Y. et.al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 5; October 2004. — Pp. 797–801.
- [34] AC breakdown characteristics of epoxy nanocomposites / Preetha P., Thomas M. J. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 5, 2011. Pp. 1526–1534.
- [35] Dielectric nanocomposites with insulating properties / Tanaka T. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. — P. 914–928.
- [36] Preparation, characterization and dielectric properties of epoxy and polyethylene nanocomposites / Zhang C., Ralf M., Stevens G. // IEEE Trans. Fundamentals of Materials (Japan), Vol. 126, 2006. P. 1105–1111.
- [37] Characterization of Tree Growth in Filled Epoxy 428 Resin: The Effect of Filler and Moisture Contents / R. Kurnianto et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2; April 2007. P. 427–435.
- [38] Cost-effective advanced thermal material for metal-core printed circuit / Winco Y. // Report at The Hong Kong Polytechnic University. 2009. Pp. 1–7.
- [39] Патент CN102936341 (A) Ningbo cen electronic material co., LTD Номер заявки: CN201210374306 20120927 (Дата публикации: 2013-02-20)
- [40] Патент CN1962799 SHANGHAI UNIVERSITY*. Номер заявки: 2006CN-0118158 2006-11-09 (Дата публикации: А 2007-05-16 В 2009-05-27)
- [41] Патент EP2945906 Composite nanoparticle, process for manufacturing same and use thereof cea – commissariat a l energie atomique et aux energies alternatives*. Номер заявки: 2015-11-25 2013FR-0050367 2013-01-16 2014WO-IB58170 2014-01-10.
- [42] Патент EP2533251 (A1) Electrical insulating material and high voltage equipment HITACHI IND EQUIPMENT SYS [JP] Номер заявки: EP20120156022 20120217 (Дата публикации: 2012-12-12)
- [43] Патент WO2014155975 Insulating thermally conductive resin composition. Номер заявки: 5718501. (Дата публикации: 2014-03-03)
- [44] Патент CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material material state grid corporation of China (SGCC)*. Номер заявки: CN201610838317 20160920 (Дата публикации: 2017-02-01)
- [45] Патент CN103525005B In Euence of Interface Structure on Dielectric Properties of Epoxy/Alumina Nanocomposites. Jinhong Yu, et. al. Номер заявки: 2013CN-0370962 (Дата публикации: 2016-05-04)

- [46] Патент EP0915484 Mica tape and insulated coil using the same. TOSHIBA KK [JP]; NIPPON RIKA KOGYOSHO KK [JP] Номер заявки: 97118448.6 (Дата публикации: 1997-10-23)
- [47] Патент RU2120145 Изоляционная лента и способ ее изготовления. Асеа Браун Бовери АГ (CH. Номер заявки: 28.12.1992 DE P 4244298.2 (Дата публикации: 1998-10-10)
- [48] Патент DE102009039456 Conducting device for electrical machine, has conductor or multiple conductors, where conductor is surrounded with mica tape. SIEMENS AG [DE] Номер заявки: DE20091039456 20090831 (Дата публикации: 2011-03-03)
- [49] Патент US2005008850 Electrolock INC (US) glass flake having high thermal conductivity. Ronald T. Flynn, Darryl A. Payne, Ralph E. Brandon. Номер заявки: 10/877,074 (Дата публикации: 2004-01-25)
- [50] Патент US 2014/0327335 A1 Electromagnetic coils, method of manufacturing same, and insulating tapes. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION HITACHI CHEMICAL COMPANY, LTD Номер заявки: 14/351,702 (Дата публикации: 2012-11-12)
- [51] Патент US 2015/0273800 A1 INSULATING TAPE, METHOD FOR PRODUCING SAME, AND STATOR COIL. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Номер заявки: 14/440,424 (Дата публикации: 2013-12-11)
- [52] Патент US 2016/0247595 A1 PREPREG MICA TAPE AND COIL USING SAME. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Номер заявки: 15/027,802 (Дата публикации: 2014-10-09)
- [53] Патент US 8 277 613 B2 PATTERNING ON SURFACE WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY MATERIALS. Siemens Energy, Inc. Дата приоритета 06.05.2010 (Дата публикации 02.10.2012)
- [54] Current Progress in High Thermal Conducting Insulation Technology for Large Capacity Turbine Generator / Takashi Harakawa, Fumio Sawa, Tetsushi Okamoto¹*, Hiroshi Hatano (Power and Industrial Systems R&D Center, Toshiba Corporation, Japan), Ken Nagakura (Keihin Product Operations, Toshiba Corporation, Japan) // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China. Pp. 2409–2412.
- [55] Highly Thermal Conductive Mica Insulating Tape for Large-Capacity Generator / Yoshitara Takezawa // Hitachi Chemical Technical Report No. 58, pp. 19–20.
- [56] Development of Larger Output Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator with High Transfer Main Insulation” A1-116 / Sako H., Koga K., Maeda H. (Mitsubishi Electric Corporation) // CIGRE 2016.
- [57] Патент US2008066942 High thermal conductivity dielectric tape. SIEMENS POWER GENERATION INC (US) Номер заявки: US20060523238 20060919 (Дата публикации: 2008-03-20)
- [58] Патент RU 2189099 STATOR WINDING INSULATION. ABB RISERCH LTD [CH] Номер заявки: DE1997120555 19970516 (Дата публикации: 2002-09-10)
- [59] Патент US5989702 SANDWICH INSULATION FOR INCREASED CORONA RESISTANCE GEN ELECTRIC CANADA Номер заявки: 08/692,961 (Дата публикации: 1996-04-07)
- [60] Патент RU 2608525 С2 3М ИННОВЕЙТИВ ПРОПЕРТИЗ КОМПАНИ (US) Номер заявки: CN 2012/082466 (Дата публикации: 29.09.2012)
- [61] Патент РФ 2534744 Электроизоляционный материал, изоляционная бумага и изоляционная лента для высоковольтной ротационной машины. СИМЕНС АКЦИЕНГЕЛЛЬШАФТ (DE) 3-ка 2012152608 Дата приоритета 07.05.2010 (Дата публикации 10.11.2011)
- [62] Патент CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Номер заявки: CN201610838317 20160920 (Дата публикации: 2017-02-01)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАННАНОВ Эмиль Рамилевич — инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

REFERENCES

- [1] Teploprovodnost sistemy izolyatsii statornoy obmotki moshchnykh turbogeneratorov s vozdushnym okhlazhdeniyem / Azizov A.Sh., Andreyev A.M., Kostelov A.M., Polikarpov Yu.I. // Elektrotehnika № 3 2009, S. 26–28.
- [2] **M. Tari, K. Yoshida, S. Sekito, J. Allison, R. Brutsch, A. Lutz**, A high voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo generators // Proceedings of the Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference. Indianapolis, Indiana, USA, IEEE. 23–25 Sept. 2003. P. 2.
- [3] Osnovnyye napravleniya i kontseptsii razvitiya proizvodstva i modifikatsii otechestvennykh khimicheskikh volokon / N.P. Prorokova, M.G. Kiselev, D.N. Klepikov // Vestnik khimicheskoy promyshlennosti. 2018. NIITEKhIM URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/osnovnye-napravleniya-i-kontseptsii-razvitiya-proizvodstva-i-modifikatsii-otchestvennykh-khimicheskikh-volokon> (Data obrashcheniya: 20.08.2020).
- [4] Poliimidnyye i aramidnyye volokna i niti so spetsialnymi svoystvami i izdeliya na ikh osnove / Musina T.K., Volokhina A.V., Shchetinin A.M., Oprits Z.G., Ivashova V.A., Kiya-Oglu V.N., Pedchenko N.V. // V mire oborudovaniya. — 2010. — № 2(9). — S. 4–8.
- [5] Impact of new motor and generator insulation systems / P. Marek, F. Senn, W. Grubelnik, W. Ladstter // energize — November 2007 — Pp. 51–55.
- [6] Patent RU2332736 MATERIAL IZOLYATSIONNOY LENTY, SPOSOB YEGO IZGOTOVLENIYA I PRIMENENIE / EDER F., GREPPEL P., PRAYBISH M., ROR K. SIMENS AKTSIENGEZELLShAFT. Nomer zayavki: 2014149116, 2013.04.04 (Data publikatsii: 2017.01.19)
- [7] **I.L. Ngo, C. Byon**, Thermal conductivity of particle-filled polymers // Polymer Science Book Series. No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects. A. MéndezVilas, A. Solano (Eds.). Badajoz, Spain: Formatex Research Center, 2016. Pp. 554–565.
- [8] **D. Mishra, A. Satapathy**, A study on thermal and dielectric characteristics of solid glass microsphere filled epoxy composites, Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects, A. Méndez-Vilas, A. Solano (Eds.), Formatex Research Center, Badajoz, Spain (2016) 13–28.
- [9] **Hong He, Renli Fu, Yanchun Han, Yuan Shen, Xiufeng Song**, Thermal conductivity of ceramic particle filled polymer composites and theoretical predictions // J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. No. 16. Pp. 6749–6754. DOI: 10.1007/s10853-006-1480-y
- [10] **V.A. Mikheyev, V.Sh. Sulaberidze**, Raschetnoeksperimentalnyye issledovaniya effektivnoy teploprovodnosti kompozitsionnykh materialov na osnove polimerov // Mir izmereniy. 2017. № 3. S. 26–28.
- [11] **M. Choudhury, S. Mohanty, K. Nayak, R. Aphale**, Preparation and characterization of electrically and thermally conductive polymeric nanocomposites // Journal of Minerals and Materials. Characterization and Engineering. 2012. Vol. 11. No. 7. Pp. 744–756.
- [12] **Jae-Jun Park, Seong-Sik Shin, ChanYoung Yoon**, Electrical and mechanical properties of epoxy micro-sized alumina composite and the effect of nano-sized alumina on those properties // Transactions on Electrical and Electronic Materials. 2015. Vol. 16. No. 5. Pp. 260–262.

- [13] **B. Reine, J. Di-Tomaso, G. Dusserre, P.A. Olivier**, Study of thermal behavior of thermoset polymer matrix filled with micro and nanoparticles // Proc. of the 15th European Conference on Composite Materials. Venice, Italy, 24–28 June, 2012. Pp. 1–9.
- [14] **Z. Han, J.W. Wood, H. Herman, C. Zhang, G.C. Stevens**, Thermal properties of composites filled with different fillers // Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, BC, Canada. 9–12 June, 2008. Pp. 499–501.
- [15] Effects of Nano-Filler Addition on Partial Discharge Resistance and Dielectric Breakdown Strength of Micro- Al_2O_3 /Epoxy Composite / Li K. Okamoto et.al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, 2010. Pp. 654–663.
- [16] The effect of frequency on the dielectric strength of epoxy resin and epoxy resin based nanocomposites / H. Jin, I. A. Tsekmes, J. Wu, A. R. Mor and J. Smit // 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017, pp. 141–143.
- [17] Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties / Toshikatsu Tanaka // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. – Pp. 914–928.
- [18] AC Breakdown Characteristics of Epoxy Nanocomposites / P. Preetha and M. J. Thomas // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18, No. 5; October 2011. Pp. 1526–1534.
- [19] Enhancing the thermal and electrical performance of epoxy microcomposites with the addition of nanofillers / I. A. Tsekmes, P. H. F. Morshuis, J. J. Smit and R. Kochetov // IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 31, no. 3, pp. 32–42, May-June 2015.
- [20] Patent US2005161210 ORGANIC MATRICES CONTAINING NANOMATERIALS TO ENHANCE BULK THERMAL CONDUCTIVITY. Hong Zhong, Schenectady, NY (US); Slawomir Rubinsztajn, Niskayuna, NY Nomer zayavki: 10/426,485 (Data publikatsii: 2003-04-03)
- [21] Patent US6160042 Surface treated boron nitride for forming a low viscosity high thermal conductivity polymer based boron nitride composition and method. Hatsuo Ishida, Edison Polymer Innovation Corporation. Nomer zayavki: 09/164,927 (Data publikatsii: 1998-10-01)
- [22] Patent US5681883 Enhanced boron nitride composition and polymer based high thermal conductivity molding compound. Richard Frank Hill; Stephen Phillip DaVanzo. Nomer zayavki: 610,764 (Data publikatsii: 1996-03-05)
- [23] Patent US2005045855 Thermal conductive material utilizing electrically conductive nanoparticles. Tonapi Sandeep Shrikant ; Zhong Hong; Simone Davide Louis; Fillion Raymond Albert; Momentive Performance Materials, INC Nomer zayavki: US20030654391 20030903 (Data publikatsii: 2005-03-03)
- [24] Patent EP1766637 Structured resin systems with high thermal conductivity fillers. SIEMENS POWER GENERATION INC Nomer zayavki: WO 2006/007385 A1 (Data publikatsii: 2006-01-19)
- [25] Development of High Thermal Conductive Laminates / M. Ito (Hikone Factory; Shin-Kobe Electric Machinery Co., Ltd) // Proc. of 2005 International Symp. on Elec. Insul. Kitakyushu, Japan. Pp. 10–15.
- [26] Effects of nano-sized particles on electrical and thermal conductivities of polymer composites / Fan L. et.al. // 9th Int. Symposium on Advanced Packaging Materials IEEE 2004. Pp. 193–199.
- [27] Vliyaniye svoystv komponentov na effektivnuyu teploprovodnost polimernykh kompozitnykh materialov / Stepanov V.V. Petrenya Yu.K., Andreyev A.M., Kostelov A.M., Mannanov E.R., Talalov V.A. // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskiye nauki. 2018. T. 11. № 4. S. 85–94. DOI: 10.18721/JPM.11408
- [28] Effect of nano-fillers on electrical treeing in epoxy resin subjected to AC voltage / Ding H.Z., Varlow B.R. // IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), 2004. Pp. 332–335.
- [29] Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro- Al_2O_3 /epoxy composite / Okamoto K. et.al. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, 2010. Pp. 654–663.
- [30] Epoxy based materials containing micro and nano sized fillers for improved electrical characteristics / Fabiani D. et.al. // IEEE Int'l. Conf. Solid Dielectr.(ICSD), Potsdam, Germany, 2010. Pp. 212–215.

- [31] Evaluation of insulation properties of epoxy resin with nano-scale silica particles / Imai T. et.al. // Intern. Symp. Electr. Insul. Mat (ISEIM), 2005. Pp. 239–242.
- [32] Insulation properties of nano- and micro-filler mixture composites / Imai T. et.al. // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions, 2006. Vol. 13. Issue 2. Pp. 319–326.
- [33] The future of nanodielectrics in the electrical power industry / Cao Y. et.al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 5; October 2004. — Pp. 797–801.
- [34] AC breakdown characteristics of epoxy nanocomposites / Preetha P. and Thomas M. J. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 5, 2011. Pp. 1526–1534.
- [35] Dielectric nanocomposites with insulating properties / Tanaka T. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, 2005. Pp. 914–928.
- [36] Preparation, characterization and dielectric properties of epoxy and polyethylene nanocomposites / Zhang C., Ralf M., Stevens G. // IEEJ Trans. Fundamentals of Materials (Japan), Vol. 126, 2006. P. 1105–1111.
- [37] Characterization of Tree Growth in Filled Epoxy 428 Resin: The Effect of Filler and Moisture Contents / R. Kurnianto et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 14, No. 2; April 2007. P. 427–435.
- [38] Cost-effective advanced thermal material for metal-core printed circuit / Winco Y. // Report at The Hong Kong Polytechnic University. 2009. Pp. 1–7.
- [39] Patent CN102936341 (A) NINGBO CEN ELECTRONIC MATERIAL CO., LTD Nomer zayavki: CN201210374306 20120927 (Data publikatsii: 2013-02-20)
- [40] Patent CN1962799 SHANGHAI UNIVERSITY* Nomer zayavki: 2006CN-0118158 2006-11-09 (Data publikatsii: A 2007-05-16 V 2009-05-27)
- [41] Patent EP2945906 COMPOSITE NANOPARTICLE, PROCESS FOR MANUFACTURING SAME AND USE THEREOF CEA – COMMISSARIAT A L ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES* Nomer zayavki: 2015-11-25 2013FR-0050367 2013-01-16 2014WO-IB58170 2014-01-10.
- [42] Patent EP2533251 (A1) Electrical insulating material and high voltage equipment HITACHI IND EQUIPMENT SYS [JP] Nomer zayavki: EP20120156022 20120217 (Data publikatsii: 2012-12-12)
- [43] Patent WO2014155975 Insulating thermally conductive resin composition. Nomer zayavki: 5718501. (Data publikatsii: 2014-03-03)
- [44] Patent CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Nomer zayavki: CN201610838317 20160920 (Data publikatsii: 2017-02-01)
- [45] Patent CN103525005B In Euence of Interface Structure on Dielectric Properties of Epoxy/Alumina Nanocomposites. Jinhong Yu, et. al. Nomer zayavki: 2013CN-0370962 (Data publikatsii: 2016-05-04)
- [46] Patent EP0915484 Mica tape and insulated coil using the same. TOSHIBA KK [JP]; NIPPON RIKA KOGYOSHO KK [JP] Nomer zayavki: 97118448.6 (Data publikatsii: 1997-10-23)
- [47] Patent RU2120145 Izolyatsionnaya lenta i sposob yeye izgotovleniya. Asea Braun Boveri AG (CH. Nomer zayavki: 28.12.1992 DE P 4244298.2 (Data publikatsii: 1998-10-10)
- [48] Patent DE102009039456 Conducting device for electrical machine, has conductor or multiple conductors, where conductor is surrounded with mica tape. SIEMENS AG [DE] Nomer zayavki: DE20091039456 20090831 (Data publikatsii: 2011-03-03)
- [49] Patent US2005008850 ELECTROLOCK INC (US) GLASS FLAKE HAVING HIGH THERMAL CONDUCTIVITY. Ronald T. Flynn, Darryl A. Payne, Ralph E. Brandon. Nomer zayavki: 10/877,074 (Data publikatsii: 2004-01-25)
- [50] Patent US 2014/0327335 A1 Electromagnetic coils, method of manufacturing same, and insulating tapes. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION HITACHI CHEMICAL COMPANY, LTD Nomer zayavki: 14/351,702 (Data publikatsii: 2012-11-12)
- [51] Patent US 2015/0273800 A1 INSULATING TAPE, METHOD FOR PRODUCING SAME, AND STATOR COIL. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Nomer zayavki: 14/440,424 (Data publikatsii: 2013-12-11)

- [52] Patent US 2016/0247595 A1 PREPREG MICA TAPE AND COIL USING SAME. MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. Nomer zayavki: 15/027,802 (Data publikatsii: 2014-10-09)
- [53] Patent US 8 277 613 B2 PATTERNING ON SURFACE WITH HIGH THERMAL CONDUCTIVITY MATERIALS. Siemens Energy, Inc. Data prioriteta 06.05.2010 (Data publikatsii 02.10.2012)
- [54] Current Progress in High Thermal Conducting Insulation Technology for Large Capacity Turbine Generator / Takashi Harakawa, Fumio Sawa, Tetsushi Okamoto^{1*}, Hiroshi Hatano (Power and Industrial Systems R&D Center, Toshiba Corporation, Japan), Ken Nagakura (Keihin Product Operations, Toshiba Corporation, Japan) // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China. Pp. 2409–2412.
- [55] Highly Thermal Conductive Mica Insulating Tape for Large-Capacity Generator / Yoshitara Takezawa // Hitachi Chemical Technical Report, No. 58, pp. 19–20.
- [56] Development of Larger Output Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator with High Transfer Main Insulation” A1-116 / Sako H., Koga K., Maeda H. (Mitsubishi Electric Corporation) // CIGRE 2016.
- [57] Patent US2008066942 High thermal conductivity dielectric tape. SIEMENS POWER GENERATION INC (US) Nomer zayavki: US20060523238 20060919 (Data publikatsii: 2008-03-20)
- [58] Patent RU 2189099 STATOR WINDING INSULATION. ABB RISERCH LTD [CH] Nomer zayavki: DE1997120555 19970516 (Data publikatsii: 2002-09-10)
- [59] Patent US5989702 SANDWICH INSULATION FOR INCREASED CORONA RESISTANCE GEN ELECTRIC CANADA Nomer zayavki: 08/692,961 (Data publikatsii: 1996-04-07)
- [60] Patent RU 2608525 S2 3M INNOVEYTIV PROPERTIZ KOMPANI (US) Nomer zayavki: CN 2012/082466 (Data publikatsii: 29.09.2012)
- [61] Patent RF 2534744 Elektroizolyatsionnyy material, izolyatsionnaya bumaga i izolyatsionnaya lenta dlya vysokovoltnoy rotatsionnoy mashiny. SIMENS AKTsiENGELLShAFT (DE) Z-ka 2012152608 Data prioriteta 07.05.2010 (Data publikatsii 10.11.2011)
- [62] Patent CN106366573 Preparation method of epoxy resin micro-nano composite insulating material. STATE GRID CORPORATION OF CHINA (SGCC)* Nomer zayavki: CN201610838317 20160920 (Data publikatsii: 2017-02-01)

THE AUTHOR

MANNANOV Emil R. — JSC “Power machines”.
E-mail: emil-mannanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.02.2021; одобрена после рецензирования 17.02.2021; принята к публикации 17.02.2021.

The article was submitted 16.02.2021; approved after reviewing 17.02.2021; accepted for publication 17.02.2021.

Научная статья

УДК 621.314.225

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27405>

Л.И. Сахно ✉, О.И. Сахно, М.С. Крылов

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

✉ Isahno2010@yandex.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ И ПОТЕРЬ В ТРАНСФОРМАТОРАХ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ ТРУБ

Аннотация. В работе рассматриваются трехобмоточные трансформаторы с двумя параллельно соединенными секциями первичной обмотки и одной вторичной обмоткой. Такая конструкция используется в трансформаторах для стыковой контактной сварки оплавлением труб. В статье дается методика расчета токов, активной мощности и потерь в обмотках, основанная на схеме замещения многообмоточного трансформатора. В основе схемы замещения трехобмоточного трансформатора лежит замена его двумя двухобмоточными трансформаторами. Все параметры схемы замещения могут быть измерены. Установлена связь между активной мощностью и потерями в обмотках, которая лежит в основе косвенного метода измерения потерь в обмотках. Анализ точности методики проведен на модельном трансформаторе МКЭ. Для пояснения методики построены векторные диаграммы, показывающие, в частности, что активная мощность в одной из первичных обмоток при коротком замыкании может быть отрицательной (угол между векторами тока и напряжения в обмотке превышает 90°). Получены соотношения между параметрами двухобмоточных трансформаторов, при которых в одной из параллельно соединенных первичных обмоток возможно появление отрицательной активной мощности. Результаты расчета токов и активных мощностей в трехобмоточном трансформаторе сварочного комплекса КСС-04 для сварки труб хорошо согласуются с результатами измерений.

Ключевые слова: трехобмоточный трансформатор, схема замещения, активная мощность, магнитное поле рассеяния, взаимная индуктивность по потокам рассеяния.

Для цитирования:

Сахно Л.И., Сахно О.И., Крылов М.С. Методика расчета и измерения активных мощностей и потерь в трансформаторах контактной стыковой сварки оплавлением труб // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 68–84. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27405>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27405>*L.I. Sakhno* ✉, *O.I. Sakhno*, *M.S. Krylov*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ lsahno2010@yandex.ru**METHOD FOR CALCULATING
AND MEASURING ACTIVE POWERS AND LOSSES
IN FLASH-BUTT WELDING TRANSFORMERS**

Abstract. The paper considers three-winding transformers with two parallel-connected sections of the primary winding and one secondary winding. This design is used in flash-butt welding transformers. The article provides a method for calculating currents, active power and losses in the windings, based on the equivalent circuit of a multi-winding transformer. The equivalent circuit of a three-winding transformer is based on its replacement with two two-winding transformers. All parameters of the equivalent circuit can be measured. The relationship between active power and winding losses has been established, which underlies the indirect method of measuring winding losses. The analysis of the accuracy of the technique was carried out on a model FEM transformer. To clarify the technique, vector diagrams have been constructed, showing, in particular, that the active power in one of the primary windings during a short circuit can be negative (the angle between the current and voltage vectors in the winding exceeds 90°). Relationships between the parameters of two-winding transformers in this case are obtained. The results of calculating the currents and active powers in the three-winding transformer of the KSS-04 welding complex for pipe welding are in good agreement with the measurement results.

Keywords: three-winding transformer, equivalent circuit, active power, magnetic leakage flux, mutual inductance on leakage flux.

Citation:

L.I. Sakhno, O.I. Sakhno, M.S. Krylov, Method for calculating and measuring active powers and losses in flash-butt welding transformers, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 68–84, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27405>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Эффективным способом сварки труб при строительстве трубопроводов является применение контактной стыковой сварки оплавлением [1–2]. При сварке магистральных трубопроводов большого диаметра (800 – 1420 мм) с 70-х годов XX века успешно используются машины контактной сварки внутритрубного исполнения, при котором сварочная машина перемещается внутри трубопровода и поочередно приваривает к его концу следующую трубу.

В последние годы для увеличения пропускной способности газопроводов давление в них стали поднимать до 11,8 МПа. Для обеспечения прочности трубопроводов необходимо применять трубы из сталей повышенного качества, что требует увеличения мощности сварочных машин. Источником сварочного тока внутритрубных машин является сварочный трансформатор тороидальной конструкции, обеспечивающий равномерное распределение тока по периметру свариваемых труб. Увеличение мощности трансформатора требует увеличения сечения его первичной обмотки без увеличения наружного габарита трансформатора. Конструктивные и технологические сложности увеличения мощности трансформаторов были преодолены на ЗАО «Псковэлектросвар»¹

¹ ЗАО «Псковэлектросвар» <https://pskovelektrosvar.ru> (дата обращения 5.07.2021)

нетрадиционным путем — секционированием обмотки на параллельные секции, вмотанные в тороидальный магнитопровод одна поверх другой. При проектировании такого трансформатора необходимо рассчитать потери в секциях и температуру нагрева обмоток в номинальном режиме работы. Стандартные методики расчета трансформаторов контактной сварки [3] не позволяют найти потери в секциях параллельных обмоток для указанной новой конструкции.

Испытания трансформатора для сварки труб с двумя параллельными секциями первичной обмотки в режиме короткого замыкания показали, что активные мощности и токи в секциях не одинаковы, причем в одной из них ваттметр показывает отрицательное значение (угол между векторами тока и напряжения в секции превышает 90°). Поскольку тепловой режим работы трансформатора является весьма напряженным и в значительной степени определяет работоспособность и надежность машины, наиболее сложной и актуальной в настоящее время задачей, стоящей перед разработчиками источников питания внутритрубных машин, является задача расчета и измерения потерь в трансформаторе с несколькими параллельными секциями первичной обмотки.

Целью настоящей статьи является разработка методики расчета активных мощностей и потерь в обмотках тороидального сварочного трансформатора с двумя параллельно соединенными секциями первичной обмотки и установление связи между потерями в секциях и показаниями ваттметров, установленных в этих секциях. Кроме того, в статье должна быть исследована точность расчета с использованием разработанной методики на основе сравнения результатов расчета с результатами численного и натурного экспериментов.

Метод исследования

Для разработки методики расчета активных мощностей и потерь используется предложенная нами в [4] схема замещения многообмоточного трансформатора, поскольку эта схема в отличие от классической трехлучевой схемы замещения трехобмоточного трансформатора [5] и ее модификаций [6–10] позволяет установить связь между активной мощностью в обмотках и потерями в них. В оригинальных схемах замещения многообмоточных трансформаторов [11, 12] не рассмотрены тороидальные трансформаторы и не установлена связь между потерями и активной мощностью в обмотках. В данной работе установить эту связь удалось благодаря физичности параметров, входящих в схему замещения [4], и наличию в ней ветвей эквивалентных секциям первичной обмотки.

В [4] рассмотрен трансформатор с n первичными обмотками и одной вторичной обмоткой. Для удобства записи уравнений трансформатора в этой работе индексы первичных обмоток имеют две цифры $11, 12... 1n$, вторичная одна цифру 2. Первая цифра 1 индекса обмотки с двумя цифрами означает, что обмотка первичная, вторая цифра — номер первичной обмотки. Первичные обмотки не соединены гальванически и подключены к источникам напряжения $u_{11}, u_{12}... u_{1n}$. Индексы источников показывают, к каким первичным обмоткам они присоединены. Вторичная обмотка 2 подключена к нагрузке z_H (для синусоидального режима $z_H = r_H + j\omega L_H$, где r_H — активное сопротивление нагрузки, L_H индуктивность, $\omega = 2\pi f$, f — частота). Этот трансформатор заменяется на n двухобмоточных трансформаторов с обмотками 11 и $2, 12$ и $2, ..., 1n$ и 2 (далее будем обозначать эти трансформаторы как $11-2, 12-2... 1n-2$). На основе классических уравнений двухобмоточных трансформаторов и метода наложения в [4] получены n -уравнений для этого трансформатора:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1i} = j\omega(L_{1i-2} + L'_{Hi})\dot{I}_{1i} + (r_{1i-2} + r'_{Hi})\dot{I}_{1i} + \\ + j\omega \sum_{\substack{l=1 \\ i \neq l}}^n (M_{1i,1l,2} + L'_{Hi})\dot{I}_{1l} + \sum_{\substack{l=1 \\ i \neq l}}^n (r_{1i,1l,2} + r'_{Hi})k_i k_l \dot{I}_{1l}, \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (1)$$

где i – номер первичной обмотки, $j = \sqrt{-1}$, $\dot{U}_i$ – напряжение на зажимах обмотки li , L_{li-2} , r_{li-2} – соответственно индуктивность и активное сопротивление короткого замыкания трансформатора $li-2$, приведенные к обмотке li , L'_{Hi} , r'_{Hi} – соответственно индуктивность и активное сопротивление нагрузки, приведенные к обмотке li , $k_i = w_{li}/w_2$, $k_l = w_{li}/w_2$ – коэффициенты трансформации двухобмоточных трансформаторов с обмотками $li-2$, $ll-2$, w_{li} , w_{ll} , w_2 – количество витков обмоток li , ll , 2 , $M_{li, ll, 2}$ – взаимная индуктивность по потокам рассеяния трансформаторов $li-2$ и $ll-2$. Взаимная индуктивность $M_{li, ll, 2}$ и параметр $r_{li, ll, 2}$ определяются из опытов короткого замыкания трансформаторов $li-2$, $ll-2$, $li-ll$:

$$M_{li, ll, 2} = (L_{li-2} + L_{ll-2} - L_{li-ll})/2, \quad (2)$$

$$r_{li, ll, 2} = (r_{li-2} + r_{ll-2} - r_{li-ll})/2, \quad (3)$$

где L_{li-2} , r_{li-2} ; L_{ll-2} , r_{ll-2} ; L_{li-ll} , r_{li-ll} – индуктивности рассеяния и активные сопротивления трансформаторов $li-2$; $ll-2$; $li-ll$ в соответствующих опытах короткого замыкания [4].

Для трехобмоточного трансформатора (рис. 1а) с двумя параллельно соединенными первичными 11 и 12 обмотками и одной вторичной обмоткой 2 , подключенной к нагрузке $z_H = r_H + j\omega L_H$, уравнение (1) примет вид:

$$\dot{U}_1 = j\omega(L_{11-2} + L'_H)\dot{I}_{11} + (r_{11-2} + r'_H)\dot{I}_{11} + j\omega(M_{11,12,2} + L'_H)\dot{I}_{12} + (r_{11,12,2} + r'_H)k_1k_2\dot{I}_{12}, \quad (4)$$

$$\dot{U}_2 = j\omega(L_{12-2} + L'_H)\dot{I}_{12} + (r_{12-2} + r'_H)\dot{I}_{12} + j\omega(M_{12,11,2} + L'_H)\dot{I}_{11} + (r_{12,11,2} + r'_H)k_2k_1\dot{I}_{11}.$$

Для данной схемы $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$, и, так как нагрузка одна, второй индекс у нагрузки опущен.

Введем обозначение $M_{11,12,2} = M_{12,11,2} = M$, $r_{11,12,2} = r_{12,11,2} = r$. С учетом введенных обозначений для режима короткого замыкания ($L'_H = 0$, $r'_H = 0$) (4) перепишем в виде:

$$\dot{U}_1 = j\omega L_{11-2}\dot{I}_{11} + r_{11-2}\dot{I}_{11} + j\omega M\dot{I}_{12} + rk_1k_2\dot{I}_{12}, \quad (5)$$

$$\dot{U}_1 = j\omega L_{12-2}\dot{I}_{12} + r_{12-2}\dot{I}_{12} + j\omega M\dot{I}_{11} + rk_2k_1\dot{I}_{11}.$$

Схема замещения, соответствующая уравнениям (5), показана на рис. 1б. На этом рисунке зависимый источник тока определяет ток во вторичной обмотке. Параллельно соединенные ветви этой схемы замещают двухобмоточные трансформаторы $11-2$ и $12-2$ с учетом их взаимного влияния. Как будет показано и подтверждено далее численным и натурным экспериментами активная мощность в каждой параллельной ветви схемы замещения совпадает с активной мощностью, измеряемой ваттметрами, установленными в секциях 11 и 12 первичной обмотки. Здесь важно, что все параметры схемы замещения, представленной на рис. 1б, можно найти экспериментально. В зависимости от соотношения индуктивностей и взаимной индуктивности в схеме на рис. 1б активные мощности (показания ваттметров) в ветвях этой схемы могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Это явление рассмотрено для индуктивно связанных катушек в [13]. Однако непосредственно перенести результаты [13] на рассматриваемый трансформатор нельзя, поскольку в схеме замещения присутствуют не индуктивности катушек, а индуктивности рассеяния трансформаторов. Кроме того, в схеме замещения имеются зависимые источники напряжения, которые появились из-за связи трансформаторов $11-2$ и $12-2$ через общую вторичную обмотку 2 .

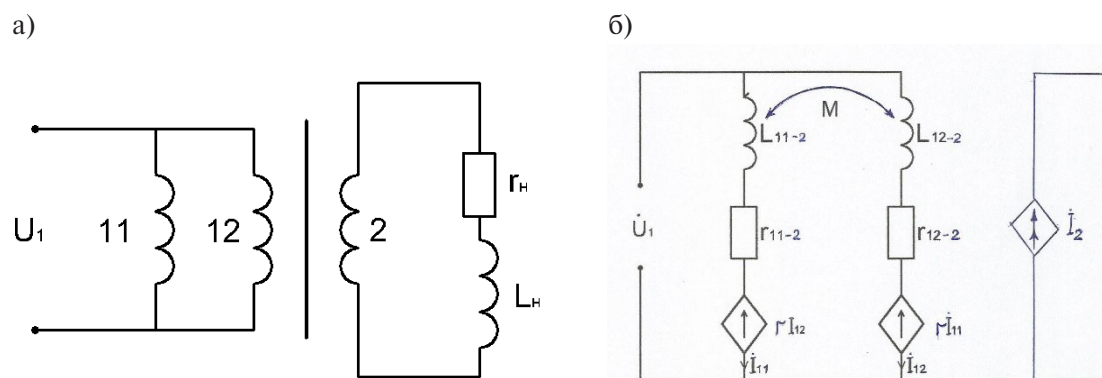


Рис. 1. Электрическая схема (а) и схема замещения (б) трехобмоточного трансформатора
Fig. 1. Electrical circuit (a) and equivalent circuit (b) of a three-winding transformer

Сопоставление результатов, полученных с использованием схемы замещения с результатами, полученными с использованием расчета трансформатора методом конечных элементов (МКЭ) с присоединённой цепью. В этом сопоставлении сравниваются результаты расчетов токов, активных мощностей и потерь в модельном трансформаторе, полученные на основе МКЭ для квазистационарного магнитного поля трансформатора совместно с уравнениями для присоединенной электрической цепи нагрузки (первый способ) с результатами, полученными по схеме замещения, рис. 1б (второй способ). Погрешность первого способа обусловлена только размерами ячеек сетки и положением границ, которые были определены предварительно, таким образом, чтобы их дальнейшее изменение (уменьшение размеров ячеек и увеличение расстояния от трансформатора до границ расчетной области) не влияли на точность расчета токов и активных мощностей в обмотках трансформатора. Этот способ соответствует натурному эксперименту, в котором амперметры и ваттметры, установленные в секциях первичной обмотки, показывают токи и активные мощности в секциях. Первый способ дает возможность найти и потери в каждой обмотке, что существенно расширяет возможности анализа точности расчета потерь в обмотках с помощью численного эксперимента по сравнению натурным опытом короткого замыкания.

В выполняемом сопоставлении параметры схемы замещения (для второго способа) находятся МКЭ из расчета режимов противотключения трансформаторов 11-2, 12-2 и 11-12. Дискретизация расчетной области и положение границы в первом и втором способе расчета одинаковы. Для расчета первым и вторым способом используется пакет программ ELCUT [14]. Выполненное сопоставление дает возможность показать справедливость предлагаемого в статье метода расчета активной мощности и потерь в параллельных секциях первичной обмотки в широком диапазоне изменения электромагнитных параметров трансформатора, в том числе при изменении этих параметров из-за влияния поверхностного эффекта. Для детального описания обоих подходов, участвующих в сопоставлении, выполним подробное описание объекта исследования.

Необходимый нам многовариантный расчет трехмерного поля даже простого по конструкции трансформатора требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому для исследования выбрана осесимметричная конструкция трансформатора (рис. 2а), которая позволяет использовать двумерную формулировку задачи. Прототипом этого трансформатора является трансформатор, описанный в [15]. Этот трансформатор имеет повышенное рассеяние, что обеспечивает возможность тщательного исследования влияния взаимной индуктивности по потокам рассеяния на токи в первичных обмотках и активную мощность в них.

Также для упрощения расчетов принято, что все обмотки трансформатора имеют одинаковое количество витков 110 (коэффициенты трансформации трансформаторов 11-2 и 12-2 равны единице). Обмотки выполнены из медного провода сечением $5 \times 5 \text{ мм}^2$.

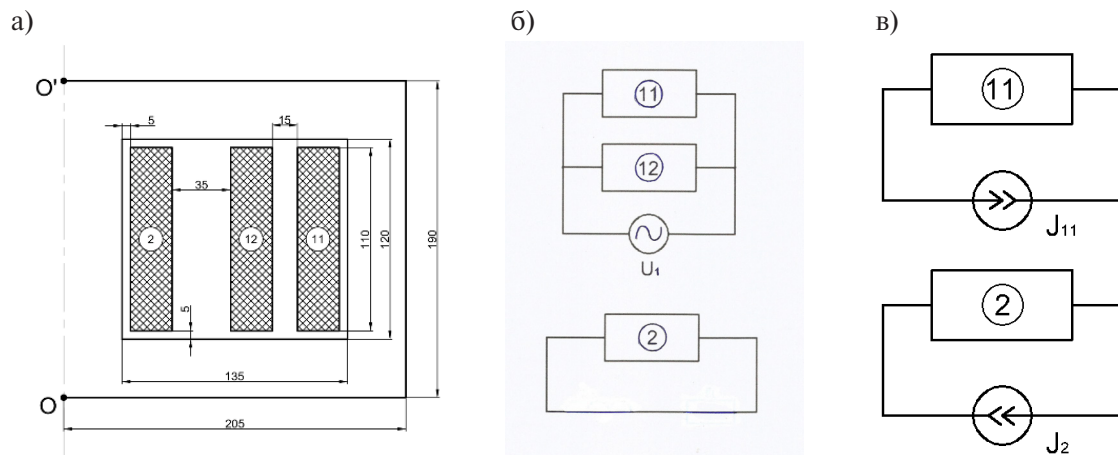


Рис. 2. Модельный трансформатор (а), присоединенная электрическая цепь для режима короткого замыкания (б), электрическая схема режима противовключения (в)

Fig. 2. Model transformer (a), connected electrical circuit for short-circuit mode (b), electrical circuit for counter-switching mode (c)

При расчете магнитного поля трансформатора совместно с уравнениями токов и напряжений цепи нагрузки расчетная область представляет собой поперечное сечение трансформатора, проходящее через ось симметрии OO' (рис. 2а), ограниченное половиной окружности, радиус которой превышает размеры поперечного сечения трансформатора. Границы расчетной области отодвинуты достаточно далеко от трансформатора, поэтому на них задано условие отсутствия поля. Присоединенная электрическая цепь представлена в виде блоков на рис. 2б, блоки 11, 12, 2 соответствуют обмоткам 11, 12, 2 в расчетной модели поля на рис. 2а. Магнитная проницаемость магнитопровода принята постоянной. Результатом решения являются комплексные амплитуды токов первичных обмоток, активные мощности и потери в обмотках.

Для использования схемы замещения на рис. 1б необходимо рассчитать импедансы двухобмоточных трансформаторов 11-2, 12-2, 11-12. Они находятся из режима противовключения, в котором вектора магнитодвижущих сил в первичной и вторичной обмотках равны и противоположно направлены [9]. При этом рассчитывается переменное магнитное поле трансформатора с электрической цепью, моделирующей режим противовключения. На рис. 2в показана электрическая схема для расчета импеданса двухобмоточного трансформатора 11-2. Согласно [9] источники тока J_{11} , J_2 на рис. 2в имеют одинаковые произвольные модули, но противоположные фазы:

$$J_{11} = I_{11} w_{11}, \quad J_2 = I_2 w_2 = -J_{11}, \quad (6)$$

где J_{11} и J_2 — токи обмоток 11 и 2 соответственно.

Результаты сопоставления способов 1 и 2. Сопоставление выполнялось для различных частот из диапазона 1–50 Гц. Широкий диапазон изменения частот использован нами для изменения соотношений между параметрами схемы замещения трансформатора и повышения достоверности расчетов. На нижнем пределе 1 Гц все электромагнитные параметры схемы замещения исследуемого трансформатора соизмеримы, а при 50 Гц (сильный поверхностный эффект) реактивные сопротивления в схеме замещения на порядок выше активных. Амплитуда источника напряжения принята равной 8 В. Расчеты выполнялись при магнитной проницаемости $\mu = 1000 \mu_0$. Дополнительное исследование показало, что изменение μ магнитопровода от $500 \mu_0$ до $10000 \mu_0$ меняет значения токов и активных мощностей обмоток не более, чем на 0,05%.

В табл. 1 приведены амплитуды и фазы токов в обмотках I_1 , I_2 и амплитуда суммарного тока I_{1m} , полученные двумя способами.

Таблица 1

Амплитуды и фазы токов обмоток

Table 1

Amplitudes and phases of winding currents

f , Гц	Способ расчета	I_{m1} , А	φ_{11} , град	I_{m2} , А	φ_{12} , град	I_{1m} , А	φ_1 , град
1	Первый	52,18	−35,6	73,78	−16,6	124,3	−24,4
	Второй	52,24	−35,1	73,89	−16,3	124,5	−24,6
50	Первый	0,85	130,4	8,39	−80,8	7,68	−84,1
	Второй	0,82	130,2	8,38	−80,2	7,69	−84,9

Результаты, представленные в табл. 1 показывают, что токи, рассчитанные двумя способами, отличаются менее, чем на 1%. Таким образом, схема замещения позволяет находить токи в обмотках с высокой точностью.

Выполним далее анализ активных мощностей и потерь, рассчитанных двумя способами. Для анализа активных мощностей первичных обмоток при коротком замыкании на рис. 3 представлены векторные диаграммы для амплитудных значений входного напряжения и токов в обмотках, полученных первым способом. Из этих диаграмм видно, что проекция ОС вектора приложенного напряжения U_{1m} на направление вектора тока I_{11} при частоте 1 Гц совпадает с направлением тока в этой обмотке, а при частоте 50 Гц противоположна этому направлению, поскольку в этом случае вектор тока в обмотке I_1 сдвинут по отношению к питающему напряжению на угол, больше 90 градусов.

Эти проекции определяют активные мощности в обмотке $I_1 P_{11} = U_{a11m} \cdot I_{11m} / 2$ и в обмотке $I_2 P_{12} = U_{a12m} \cdot I_{12m} / 2$ и суммарную активную мощность P в трансформаторе. Активные мощности P_{11} , P_{12} , P равны активным мощностям, измеряемым ваттметрами, установленными в секциях первичной обмотки. Результаты расчета активных составляющих напряжения, активных мощностей, потерь в обмотках I_1 , I_2 , даны в табл. 2. В этой таблице $P_{п11}$, $P_{п12}$, $P_{п2}$ – потери в обмотках I_1 , I_2 и 2.

Таблица 2

Амплитуды активных составляющих напряжения, активных мощностей и потерь (способ 1)

Table 2

Amplitudes of active voltage components, active powers and losses (method 1)

f , Гц	U_{a11m} , В	U_{a12m} , В	P_{11} , Вт	P_{12} , Вт	P , Вт	$P_{п11}$, Вт	$P_{п12}$, Вт	$P_{п2}$, Вт	$P_{п}$, Вт
1	6,5	7,66	170	282	453	103	151	199	453
50	−5,19	1,27	−2,20	5,37	3,16	0,032	2,2	0,908	3,14

Суммарная активная мощность в модельном трансформаторе, найденная по формуле $P = \text{Re}(I_1 U^*)$, где $*$ – символ комплексного сопряжения, для заданной частоты совпадает со значением суммарной активной мощности $P = P_{11} + P_{12}$ и суммой потерь в обмотках $P = P_{п11} + P_{п12} + P_{п2}$. Из диаграмм на рис. 3 виден только результат – в обмотке I_1 угол между током и напряжением больше 90° при частоте 50 Гц, что привело к отрицательной активной мощности в

этой обмотке. Однако не ясно, какие параметры трансформатора привели к получению такого результата.

Для анализа этого явления получим активные мощности в обмотках вторым способом, то есть используя схему замещения на рис. 1б. Параметры схемы замещения, найденные из режимов противовключения, а также активные сопротивления обмоток r_{11} , r_{12} , r_2 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры схемы замещения токи и активные мощности (способ 2)

Table 3

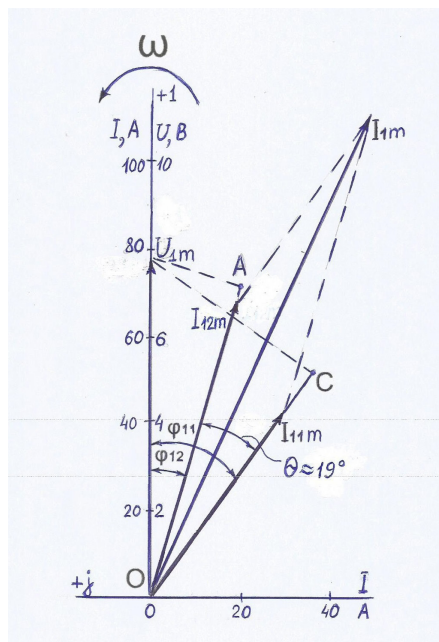
Equivalent circuit parameters currents and active powers (method 2)

f , Гц	ωL_{11-2} , Ом	ωL_{12-2} , Ом	r_{11-2} , Ом	r_{11} , Ом	Δr , Ом	r_{12-2} , Ом	r_{12} , Ом	r_2 , Ом	r , Ом	ωM , Ом
1	0,0456	0,0208	0,101	0,0753	0,00001	0,0814	0,0555	0,0259	0,0259	0,0229
50	2,27	1,04	0,146	0,0892	0,0259	0,095	0,0654	0,0309	0,044	1,14

При 1 Гц (слабый поверхностный эффект) из (3) следует, что сопротивление вторичной обмотки совпадает с коэффициентом r . При 50 Гц (сильный поверхностный эффект) в сопротивление r_{11-2} входит добавочное сопротивление Δr , которое создается полем рассеяния в обмотке 12, расположенной между секцией 11 и обмоткой 2 (рис. 2а). Коэффициент r отличается от сопротивления вторичной обмотки на величину $\Delta r/2$, что следует из (3). Векторные диаграммы для амплитуд, построенные с использованием параметров схемы замещения в табл. 2 согласно (5), представлены на рис. 4.

Из диаграмм видно, что активные составляющие напряжения на каждой обмотке складываются не только из падения напряжения на активных сопротивлениях r_{11-2} или r_{12-2} , но и из проек-

а)



б)

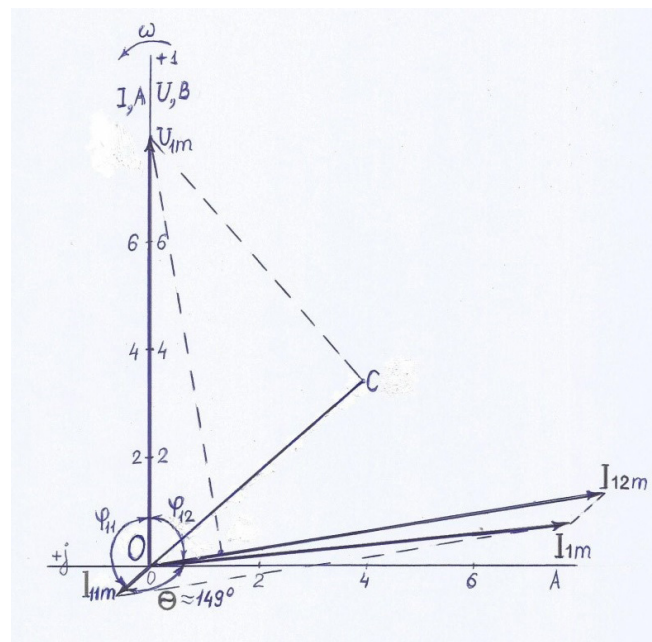
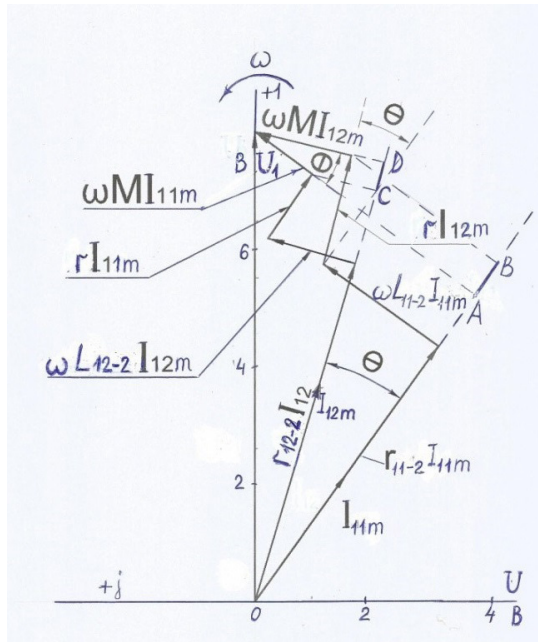


Рис. 3. Векторные диаграммы для частоты 1 Гц (а) и 50 Гц (б)

Fig. 3. Vector diagrams for a frequency of 1 Hz (a) and 50 Hz (b)

а)



б)

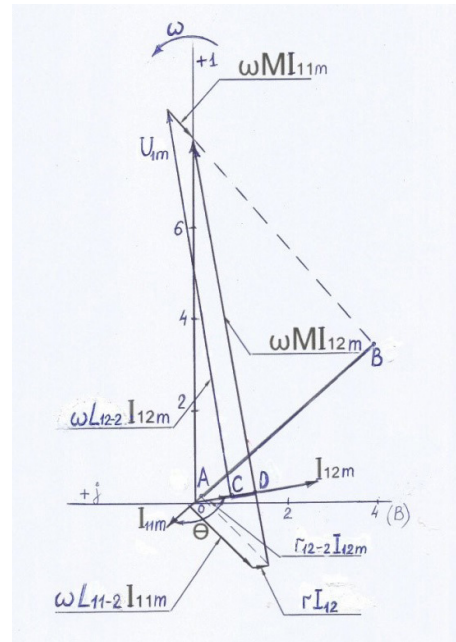


Рис. 4. Векторные диаграммы для схемы замещения при частотах 1 Гц (а) и 50 Гц (б)

Fig. 4. Vector diagrams for the equivalent circuit at frequencies of 1 Hz (a) and 50 Hz (b)

ций двух векторов — вектора независимого источника напряжения и вектора напряжения, зависящего от взаимной индуктивности. Как для частоты 1 Гц, так и для частоты 50 Гц проекция вектора $\omega \vec{M} \vec{I}_{12m}$ на направление вектора $\vec{I}_{11m}$ (отрезок AB) противоположно направлению этого вектора, а проекция $\omega \vec{M} \vec{I}_{11m}$ на направление вектора $\vec{I}_{12m}$ (отрезок CD) совпадает с направлением этого вектора, поэтому эти составляющие имеют разные знаки. Активные составляющие напряжений на обмотках 11 и 12 на рис. 4 равны:

$$U_{a11m} = r_{11-2} I_{11m} + r I_{12m} \cos \theta - \omega M I_{12m} \sin \theta, \quad (7)$$

$$U_{a12m} = r_{12-2} I_{12m} + r I_{11m} \cos \theta + \omega M I_{11m} \sin \theta, \quad (8)$$

где θ — угол между векторами токов $\vec{I}_{11m}$, $\vec{I}_{12m}$.

Активные мощности в обмотках:

$$P_{11} = U_{a11} I_{11} = r_{11-2} I_{11}^2 + r I_{11} I_{12} \cos \theta - \omega M I_{11} I_{12} \sin \theta = P_{11-2} + P_r - P_M, \quad (9)$$

$$P_{12} = U_{a12} I_{12} = r_{12-2} I_{12}^2 + r I_{11} I_{12} \cos \theta + \omega M I_{11} I_{12} \sin \theta = P_{12-2} + P_r + P_M,$$

где I_{11} , I_{12} , U_{a11} , U_{a12} — соответственно действующие значения токов в обмотках 11, 12 и активных напряжений на них.

В (9) слагаемые $P_{11-2} = I_{11}^2 r_{11-2}$, $P_{12-2} = I_{12}^2 r_{12-2}$ определяют мощности потерь энергии в трансформаторах 11-2, 12-2, приведенные к своим первичным обмоткам. Выражение $P_M = \omega M I_{11} I_{12} \sin \theta$ определяет мощность, передаваемую из одного трансформатора в другой вследствие индуктив-

ной связи между ними через магнитное поле рассеяния. Выражение $P_r = I_{11}I_{12}r\cos\theta$ определяет мощность потерь энергии в одном трансформаторе за счет падения напряжения на общей для двух трансформаторов вторичной обмотке 2 (с учетом добавочных потерь). Полная активная мощность всей цепи из (9) равна сумме потерь в обмотках:

$$P = P_{11} + P_{12} = r_{11-2}I_{11}^2 + r_{12-2}I_{12}^2 + 2rI_{11}I_{12}\cos\theta = P_{111} + P_{112} + P_{122}. \quad (10)$$

Полная мощность P не зависит от мощности P_M , передаваемой из одного трансформатора в другой вследствие индуктивной связи между ними через магнитное поле рассеяния. Амплитуды активных составляющих напряжения, рассчитанные по (7), (8) представлены в табл. 4, а составляющие активных мощностей – в табл. 5. Активные составляющие напряжения для частоты 1 Гц в обмотке 11 определяются, в основном, падением напряжения на активных сопротивлениях трансформаторов 11-2 и 12-2. Отрицательная составляющая активного напряжения, определяемая взаимной индукцией, мала по сравнению с положительными, поэтому активная мощность в обмотке 11 положительна. Для 50 Гц проекция вектора $\omega M\vec{I}_{12m}$ на направление вектора $\vec{I}_{11m}$, направленная противоположно этому вектору, существенно превышает все положительные составляющие активного напряжения обмотки 11, что приводит к отрицательной активной мощности в этой обмотке.

Таблица 4

Амплитуды активных составляющих напряжения

Table 4

Amplitudes of active voltage components

$f, \text{ Гц}$	$I_{11m}r_{11-2}$	$I_{12m}r\cos\theta$	$\omega MI_{12m}\sin\theta$	U_{a11m}	$I_{12m}r_{12-2}$	$I_{11m}r\cos\theta$	$\omega MI_{11m}\sin\theta$	U_{a12m}
1	5,31	1,81	0,545	6,57	6,0	1,29	0,386	7,67
50	0,124	-0,315	4,95	-5,14	0,797	-0,0319	0,50	1,26

Таблица 5

Составляющие активной мощности

Table 5

Active power components

$f, \text{ Гц}$	Трансформатор 11-2				Трансформатор 12-2			
	$P_{11}^2 r_{11-2}$	$I_{11}I_{12}r\cos\theta$	$\omega MI_{11}I_{12}\sin\theta$	P_{11}	$P_{12}^2 r_{12-2}$	$I_{11}I_{12}r\cos\theta$	$\omega MI_{11}I_{12}\sin\theta$	P_{12}
1	138,5	47,2	14,28	171	221	47,2	14,28	282
50	0,053	-0,134	2,10	-2,18	3,34	-0,13	2,09	5,29

Анализ результатов в табл. 4, 5, а также результатов, полученных для других частот указанного выше диапазона, показывает, что при положительном значении взаимной индуктивности по потокам рассеяния обмоток ($M > 0$) и $L_{11-2} > M > L_{12-2}$ энергия передается из двухобмоточного трансформатора с меньшей индуктивностью рассеяния в трансформатор с большей индуктивностью. Активная мощность в трансформаторе с большей индуктивностью будет отрицательной, если $\omega MI_{11}I_{12}\sin\theta$ в этом трансформаторе превышает сумму двух активных мощностей $I_{11}^2 r_{11-2}$ и $I_{11}I_{12}\cos\theta$. Полученные соотношения отличаются от соотношений, полученных для двух индук-

тивно связанных катушек с индуктивностями L_1, L_2 и взаимной индуктивностью M , в которых при $M > 0$ отрицательная активная мощность появляется в катушке с большей индуктивностью при условии $\omega M I_1 I_2 \cdot \sin \theta > r_1 I_{11}^2$ (I_1, I_2 — токи в катушках, θ — угол между векторами токов).

Таким образом, нами сформулированы условия возможности получения отрицательной активной мощности в одной из параллельно соединенных первичных обмоток трансформатора. Кроме того, можно сделать вывод о том, что схема замещения позволяет с высокой точностью рассчитывать активную мощность в обмотках рассматриваемого трансформатора, поскольку результаты расчета активных мощностей в обмотках 11 и 12 в табл. 2 и 5 (первый и второй способ расчета) отличаются не более, чем на 1,5%.

Далее необходимо установить связь активной мощности в обмотках и потерями в них. Из (9) можно найти потери в трансформаторах 11-2 и 12-2:

$$r_{11-2} I_{11}^2 = P_{11} - r I_{11} I_{12} \cos \theta + \omega M I_{11} I_{12} \sin \theta, \quad (11)$$

$$r_{12-2} I_{11}^2 = P_{12} - r I_{11} I_{12} \cos \theta - \omega M I_{11} I_{12} \sin \theta. \quad (12)$$

Потери в этих трансформаторах состоят из потерь в первичных и вторичных обмотках:

$$r_{11-2} I_{11}^2 = r_{11} I_{11}^2 + r_2 I_{11}^2, \quad (13)$$

$$r_{12-2} I_{12}^2 = r_{12} I_{12}^2 + r_2 I_{12}^2. \quad (14)$$

При слабом поверхностном эффекте активное сопротивление r_2 совпадает с коэффициентом r , найденным из трех опытов короткого замыкания, что следует из (3). Тогда потери в обмотках 11 и 12 из (13), (14) равны:

$$P_{\pi 11} = r_{11-2} I_{11}^2 - r I_{11}^2, \quad (15)$$

$$P_{\pi 12} = r_{12-2} I_{12}^2 - r I_{12}^2. \quad (16)$$

Используя (10), находим потери во вторичной обмотке:

$$P_{\pi 2} = P - P_{\pi 11} - P_{\pi 12}. \quad (17)$$

Для частоты 1 Гц, для которой $r_2 = r$ (табл. 2), потери в обмотках, рассчитанные по (15)-(17), отличаются от точных значений (первый способ расчета) не более, чем на 1,5%. Следовательно, схема замещения позволяет в этом случае с высокой точностью рассчитывать потери в обмотках.

При сильном поверхностном эффекте параметр r может отличаться от сопротивления вторичной обмотки r_2 из-за добавочных сопротивлений, вызванных полем рассеяния. Например, в опыте короткого замыкания трансформатора 11-2 между обмотками 11 и 2 находится обмотка 12 (рис. 2а), в которой наводятся вихревые токи полем рассеяния. Добавочное сопротивление Δr , обусловленное вихревыми токами в обмотке 12, которое пренебрежимо мало при 1 Гц, при 50 Гц (табл. 2) составляет почти 17%. Согласно (3) коэффициент r будет отличаться от сопротивления вторичной обмотки в этом режиме на величину $\Delta r/2$, поэтому:

$$r_2 = r - \Delta r/2. \quad (18)$$

Результаты расчета потерь по (15)-(17) для 50 Гц даны в табл. 6.

Таблица 6

Потери в обмотках

Table 6

Losses in windings

f , Гц	$P_{\text{п1}}$, Вт	$P_{\text{п2}}$, Вт	$P_{\text{п2}}$, Вт	P , Вт
1	103	150	200	453
50	0,032	2,24	0,90	3,17

Совпадение активных мощностей и потерь, рассчитанных двумя способами (табл. 2 и 6), подтверждает справедливость и высокую точность методики расчета потерь в обмотках с использованием схемы замещения.

Важно отметить, что активные сопротивления в (15)–(18) могут быть измерены в опытах короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов 11-2, 12-2 и 11-12. Далее измерив токи в обмотках в опыте короткого замыкания трехобмоточного трансформатора, можно найти потери в каждой его обмотке. Таким образом, (11)–(18) лежат в основе косвенного измерения потерь в обмотках.

**Результаты расчета активной мощности и потерь
в трансформаторе комплекса КСС-04 для стыковой контактной сварки труб**

Применим разработанную методику к расчету и анализу активной мощности и потерь в трансформаторе КСС-04 для контактной стыковой сварки оплавлением труб диаметром 1420 мм, который разработан и испытан в ЗАО «Псковэлектросвар». На рис. 5а показано поперечное сечение, проходящее через ось симметрии этого трансформатора».

На тороидальный магнитопровод 1 (рис. 5а) намотана первичная обмотка 2, состоящая из двух параллельно соединенных секций. Вторичная обмотка 3 имеет один виток, который представляет собой медный корпус, охватывающий первичную обмотку. Поперечное сечение вторичной обмотки заштриховано. В этом корпусе сделан разрез 4, к краям которого в определенных местах периметра разреза прикрепляются гибкие медные шины 5. В данном трансформаторе шины установлены на одинаковом расстоянии в 18 местах периметра разреза. Для пояснения конструкции на рис. 1б показан внешний вид трансформатора с гибкими шинами, на котором виден корпус (вторичная обмотка) и гибкие шины, расположенные по периметру разреза.

К гибким шинам крепятся массивные проводники 6. Эти проводники плотно примыкают к предварительно зачищенным внутренним поверхностям свариваемых труб 7 и 8. При сближении труб ток во вторичной обмотке замыкается по гибким шинам 5, массивным проводникам 6 и стыку свариваемых труб. Высокая плотность тока в стыке труб приводит к оплавлению кромок труб, после чего трубы с усилием прижимаются и происходит их соединение. Первичная обмотка трансформатора выполнена из медного провода ПМГ ЛБН с прямоугольным сечением 20×9 мм², количество витков первичной обмотки – 52. Номинальное первичное напряжение $U_1 = 380$ В, частота $f = 50$ Гц. Номинальная эквивалентная длительная мощность трансформатора составляет 577 кВА, номинальный эквивалентный длительный первичный ток – 1442 А.

Схема опыта короткого замыкания показана на рис. 6, результаты измерений в табл. 7. Активные мощности P_{11} , P_{12} и токи I_{11} , I_{12} в секциях первичной обмотки 1, 2 измерялись клещами-ваттметрами АК ИП².

Входная активная мощность P и входной ток I измерялись с помощью комплекта измерительного К-540³.

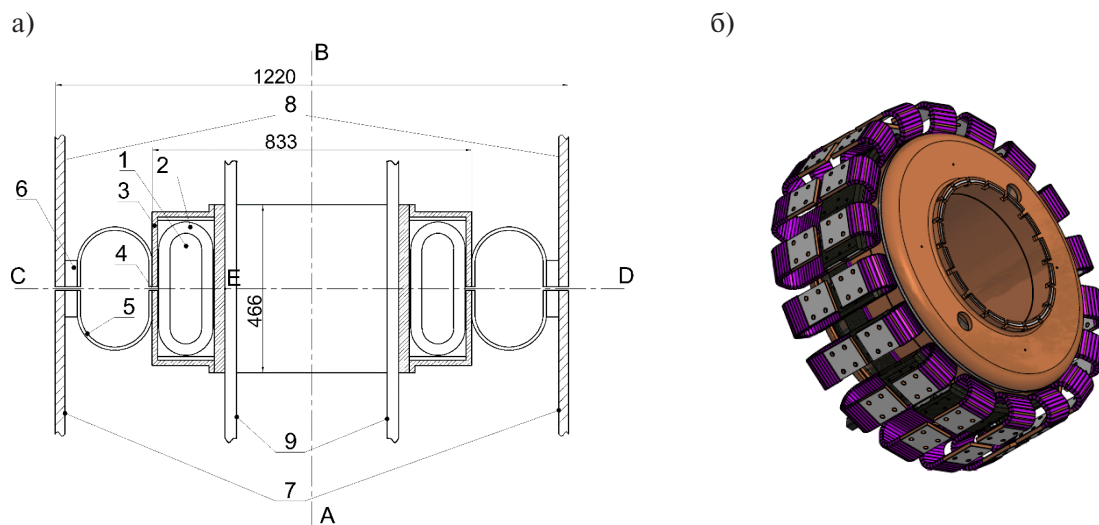


Рис. 5. Конструкция трансформатора КСС-04

Fig. 5. KSS-04 transformer design

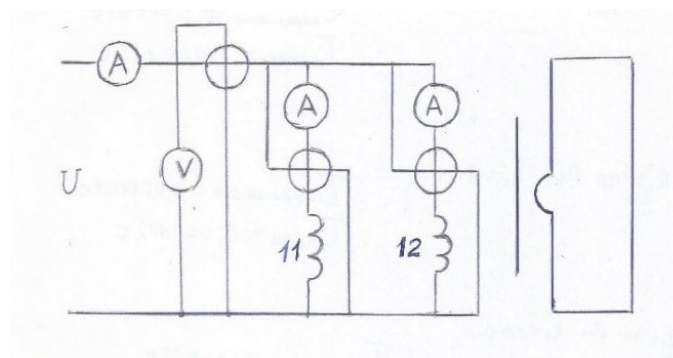


Рис. 6. Схема опыта короткого замыкания 11, 12-секции первичной обмотки

Fig. 6. Short circuit experiment circuit 11, 12 are primary winding sections

Таблица 7

Результаты опыта короткого замыкания

Table 7

Results of the short circuit test

I, A	U, B	$P, кВт$	I_{11}, A	I_{12}, A	$P_{11}, кВт$	$P_{12}, кВт$
847,5	25,6	6,2	495	405	6,9	-0,7

Данные табл. 7 показывают, что измеренные в секциях первичной обмотки активные мощности отличаются приблизительно в десять раз. Отрицательное показание ваттметра в секции 12 означает, что угол φ_2 между входным напряжением U и током I_{12} в секции 12 больше 90° .

Для определения параметров схемы замещения выполнен расчет 2D магнитных полей рассеяния трансформаторов 11-2, 12-2 и 11-12. Результаты расчета и измерения параметров схемы замещения отличаются на 10–12%. Параметры схемы замещения, найденные из опытов, приведены в табл. 8.

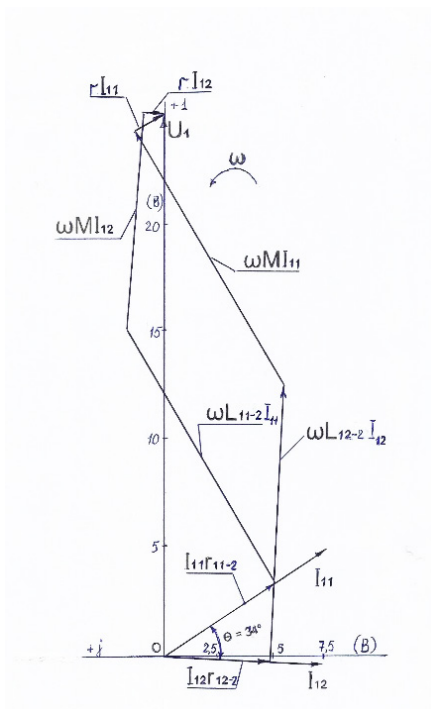


Рис. 7. Векторная диаграмма для схемы замещения
Fig. 7. Vector diagram for equivalent circuit

Таблица 8

Параметры схемы замещения

Table 8

Equivalent circuit parameters

$\omega L_{11-2}, \text{ Ом}$	$r_{11-2}, \text{ Ом}$	$\omega L_{12-2}, \text{ Ом}$	$r_{12-2}, \text{ Ом}$	$\omega M, \text{ Ом}$	$r, \text{ Ом}$
0,028	0,013	0,032	0,012	0,027	0,004

Для данного трансформатора взаимная индуктивность по потокам рассеяния положительна, следовательно, отрицательная активная мощность может появиться в трансформаторе 12-2, так как $L_{12-2} > L_{11-2}$. На рис. 7 показана векторная диаграмма, из которой можно найти активные составляющие напряжений на секциях первичной обмотки и активные мощности в них (табл. 9). Из диаграммы видно, что угол между первичным напряжением и током в секции 12 больше 90° .

Таблица 9

Активные мощности

Table 9

Active powers

$P_{11} r_{11-2}, \text{ Вт}$	$I_{11} I_{12} r \cos \theta, \text{ Вт}$	$\omega M I_{11} I_{12} \sin \theta, \text{ Вт}$	$P_{11}, \text{ Вт}$	$P_{12} r_{12-2}, \text{ Вт}$	$I_{11} I_{12} r \cos \theta, \text{ Вт}$	$\omega M I_{11} I_{12} \sin \theta, \text{ Вт}$	$P_{12}, \text{ Вт}$	$P, \text{ Вт}$
3,1	0,5	3,1	6,7	2,0	0,6	-3,24	-0,64	6,06

Поскольку в обмотке I_2 составляющая напряжения $\omega M I_1 \sin \theta$, имеющая отрицательное значение, превышает сумму двух падений напряжения $I_2 r_{12-2}$ и $I_1 r \cos \theta$, результирующее активное напряжение в обмотке I_2 отрицательно, следовательно, и активная мощность в обмотке, которую оно определяет, также имеет отрицательное значение. Разница между рассчитанными и измеренными значениями активных мощностей в обмотке I_1 составляет 3%, а в обмотке I_2 – 9%. В обмотке I_2 погрешность больше, чем в I_1 , поскольку потери в ней представляют собой разницу близких чисел. Для увеличения точности необходимо увеличить точность расчета и измерения параметров схемы замещения.

Найдем потери в обмотках трансформатора, используя измеренные активные мощности в обмотках и параметры схемы замещения. Поскольку первичная обмотка выполнена из литцендрата, пренебрежем добавочными потерями в обмотке I_2 в опыте короткого замыкания (режиме противозамыкания) трансформатора 11-2. Тогда по (11)–(17) получаем: $P_{\text{п11}} = 2,2$ кВт, $P_{\text{п12}} = 1,4$ кВт, $P_{\text{п11}} = 2,5$ кВт. Эти потери являются исходными данными для дальнейшего расчета теплового режима трансформатора.

Заключение

В статье разработана методика расчета активных мощностей и потерь в трехобмоточном трансформаторе с двумя параллельными первичными обмотками, основанная на схеме замещения трансформатора [4] и анализе векторных диаграмм токов и напряжений в трансформаторе. Новизна методики состоит в установлении связи между активными мощностями в обмотках и потерями в них. Эта связь необходима как для расчета потерь в обмотках, так и для косвенного измерения потерь в обмотках. Благодаря применению этой методики удалось объяснить появление отрицательной активной мощности в одной из секций первичной обмотки. Методика расчета позволила установить новые соотношения между параметрами двухобмоточных трансформаторов, входящих в трехобмоточный трансформатор, при которых в одной из параллельно соединенных первичных обмоток возможно появление отрицательной активной мощности. Эти соотношения подтверждены результатами численного и натурного эксперимента. Численный эксперимент на модельном трансформаторе показал высокую точность расчета с использованием разработанной методики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Хоменко В.И., Теренин А.Н., Кучук-Яценко С.И., Швец Ю.И. Контактная стыковая сварка оплавлением современных трубопроводов большой мощности // Журнал нефтегазового строительства. 2014, № 3. С. 52–58.
- [2] Журавлёв С.И. Пути решения проблем внедрения контактной стыковой сварки оплавлением на магистральных трубопроводах больших диаметров (обзор) // Изв. Высших учебных заведений. Машиностроение. 2013, № 8, с. 64–70.
- [3] Рыськова З.С., Федоров П.Д., Жимерова В.И. Трансформаторы для электрической контактной сварки. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 124 с.
- [4] Сахно Л.И., Сахно О.И., Крылов М.С. Методика расчета токов в обмотках трансформаторов для стыковой сварки газопроводов // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 5. С. 88–97.
- [5] Вольдек А.И. Электрические машины: Л.: Энергия, 1978. 832 с.
- [6] Kant P., Singh B. Multiwinding transformer FED CHB inverter with on-line switching angle calculation based SHE technique for vector controlled induction motor drive, IEEE Transaction on Industry Application. 56 (3) (2020) 2807–2815.

- [7] **Alvarez-Mario C., Leon F., Lopez-Fernandez X.M.** Equivalent Circuit for Leakage Inductance of Multiwinding Transformers: Unification of terminal and duality models, IEEE transactions on power delivery. 27 (1) (2012) 353–361.
- [8] **Leon F., Martinez J.A.** Dual Three-winding Transformer Equivalent Circuit matching Leakage measurements, IEEE transaction on power delivery. 24 (1) (2009) 160–168.
- [9] **Бутырин П.А., Алпатов М.Е.** Аналитическая теория трансформаторов. М.: Национальный исследовательский университет МЭИ. 2019. С. 112.
- [10] **Миронюк Н.Е., Соболев А.С., Пудов В.И.** Расчетная модель для оценки характеристик электромагнитных трансформаторов тока // Электричество. 2016. № 2. С. 19–28.
- [11] **Шакиров М.А.** Вектор Пойнтинга и новая теория трансформаторов. Часть 3. «Анатомия» трансформатора // Электричество, 2017, № 3, С. 37–49.
- [12] **Шакиров М.А.** Вектор Пойнтинга и новая теория трансформатора // Ч. 9. Размещение обмоток на разных стержнях магнитопровода. 2020, № 1, С. 39–50.
- [13] **Модеров А.А.** Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей. Лабораторный практикум. 2003. С. 195.
- [14] **Дубицкий С.Д.** Инженерное моделирование квазистатического электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники // Силовая электроника. № 6. 2017. С. 64–68.
- [15] **Kharlamova E., Sakhno L., Sakhno O.** Calculation and Measurement of the Magnetic Flux in the Magnetic Core of Welding Transformers International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 11 (22) (2016) 11055–11059.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

САХНО Людмила Ивановна — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: lsahno2010@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7204-5449>

САХНО Ольга Ивановна — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: Olasahno@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8879-986X>

КРЫЛОВ Михаил Сергеевич — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: akrobat11@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7547-7709>

REFERENCES

- [1] **V.I. Khomenko, A.N. Terenin, S.I. Kuchuk-Yatsenko, Yu.I. Shvets,** Kontaktnaya stykovaya svarka oplavleniyem sovremennykh truboprovodov bolshoy moshchnosti // Zhurnal neftegazovogo stroitelstva. 2014, № 3. S. 52–58.
- [2] **S.I. Zhuravlev,** Puti resheniya problem vnedreniya kontaktnoy stykovoy svarki oplavleniyem na magistralnykh truboprovodakh bolshikh diametrov (obzor) // Izv. Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. 2013, № 8, s. 64–70.

- [3] **Z.S. Ryskova, P.D. Fedorov, V.I. Zhimerova**, Transformatory dlya elektricheskoy kontaktnoy svarki: L.: Energoatomizdat, 1990. 124 s.
- [4] **L.I. Sakhno, O.I. Sakhno, M.S. Krylov**, Metodika rascheta tokov v obmotkakh transformatorov dlya stykovoy svarki gazoprovodov // Izvestiya RAN. Energetika. 2019. № 5. S. 88–97.
- [5] **A.I. Voldek**, Elektricheskiye mashiny. L.: Energiya, 1978. 832 s.
- [6] **P. Kant, B. Singh**, Multiwinding transformer FED CHB inverter with on-line switching angle calculation based SHE technique for vector controlled induction motor drive, IEEE Transaction on Industry Application. 56 (3) (2020) 2807–2815.
- [7] **C. Alvarez-Mario, F. Leon, X.M. Lopez-Fernandez**, Equivalent Circuit for Leakage Inductance of Multiwinding Transformers: Unification of terminal and duality models, IEEE transactions on power delivery. 27 (1) (2012) 353–361.
- [8] **F. Leon, J.A. Martinez**, Dual Three-winding Transformer Equivalent Circuit matching Leakage measurements, IEEE transaction on power delivery. 24 (1) (2009) 160–168.
- [9] **P.A. Butyrin, M.Ye. Alpatov**, Analiticheskaya teoriya transformatorov. M.: Natsionalnyy issledovatel'skiy universitet MEI. 2019. S. 112
- [10] **N.Ye. Mironyuk, A.S. Sobolev, V.I. Pudov**, Raschetnaya model dlya otsenki kharakteristik elektromagnitnykh transformatorov toka // Elektrichestvo. 2016. № 2. S. 19–28.
- [11] **M.A. Shakirov**, Vektor Poyntinga i novaya teoriya transformatorov. Chast 3. «Anatomiya» transformatora // Elektrichestvo, 2017, № 3, S. 37–49.
- [12] **M.A. Shakirov**, Vektor Poyntinga i novaya teoriya transformatora // Ch. 9. Razmeshcheniye obmotok na raznykh sterzhnyakh magnitoprovoda. 2020, № 1, S. 39–50.
- [13] **A.A. Moderov**, Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Teoriya elektricheskikh tsepey. Laboratornyy praktikum. 2003. S. 195.
- [14] **S.D. Dubitskiy**, Inzhenernoye modelirovaniye kvazistaticheskogo elektromagnitnogo polya v programme ELCUT dlya zadach elektroniki // Silovaya elektronika. № 6. 2017. S. 64–68.
- [15] **E. Kharlamova, L. Sakhno, O. Sakhno**, Calculation and Measurement of the Magnetic Flux in the Magnetic Core of Welding Transformers International Journal of Applied Engineering Research (IJAER). 11 (22) (2016) 11055–11059.

THE AUTHORS

SAKHNO Liudmila I. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: lsahno2010@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7204-5449>

SAKHNO Olga I. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: Olasahno@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8879-986X>

KRYLOV Mikhail S. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: akpo6at11@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7547-7709>

Статья поступила в редакцию 06.07.2021; одобрена после рецензирования 22.07.2021; принята к публикации 27.09.2021.

The article was submitted 06.07.2021; approved after reviewing 22.07.2021; accepted for publication 27.09.2021.

Научная статья
УДК 532.529:536.24
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

Н.Н. Кортиков ✉

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

✉ n-kortikov@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛОВОЙ ЛОПАТКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Аннотация. Проведена оптимизация системы конвективно-плёночного охлаждения сопловой лопатки первой ступени ГТУ на основе единой информационной среды с включением в нее эффективного метода оптимизации, использующего поверхность отклика, алгоритм не прямой оптимизации на основе принципов самоорганизации (IOSO). В работе предложена математическая модель по расчету температуры стенки при конвективно-плёночном охлаждении на базе эмпирических данных для определения коэффициента теплоотдачи и эффективности плёночного охлаждения. Разработан единый код, позволяющий объединить FORTRAN – программу для вычисления глубины охлаждения перфорированной пластины и оптимизатор IOSO. Результаты расчетов отмечают уменьшение относительного расхода охладителя (с 7% до 6%) при вновь полученных распределениях по отверстиям расхода охладителя, диаметров отверстий выдува и шага системы перфорации (при среднем значении глубины охлаждения – 0,65), благодаря чему возможна прибавка мощности ГТУ в 160 кВт.

Ключевые слова: энергетическая газовая турбина; сопловая лопатка, конвективно-плёночная система охлаждения, математическая модель, оптимизация, массовый расход.

Для цитирования:

Кортиков Н.Н. Оптимизация системы охлаждения сопловой лопатки энергетической газовой турбины // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 85–95. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

N.N. Kortikov ✉

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

✉ n-kortikov@yandex.ru

OPTIMIZATION OF THE COOLING SYSTEM OF THE NOZZLE BLADE OF AN ENERGY GAS TURBINE

Abstract. The system of convective-film cooling of the first stage nozzle blade of the gas turbine is optimized on the basis of a unified information environment with the inclusion of an effective optimization method using the response surface, an indirect optimization algorithm based on the principles of self-organization (IOSO). The paper proposes a mathematical model for calculating the wall temperature during convective film cooling based on empirical data to determine the heat transfer coefficient and the efficiency of film cooling. A single code has been developed that allows combining a FORTRAN program for calculating the cooling depth of a perforated plate and an IOSO optimizer. The calculation results indicate a decrease in the relative flow rate of the cooler (from 7% to 6%) due to the newly obtained distributions of the cooler flow rate, the diameter of the blow holes and the pitch of the perforation system (with an average cooling depth of 0.65). Thus, it is possible to increase the power of the gas turbine by 160 kW.

Keywords: energy gas turbine; nozzle blade, convective-film cooling system, mathematical model, optimization, mass flow.

Citation:

N.N. Kortikov, Optimization of the cooling system of the nozzle blade of an energy gas turbine, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 85–95, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27406>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. В [1] сформирована концепция и определены основные этапы освоения отечественных газотурбинных технологий. Первый этап включает разработку и серийное производство отечественных газовых турбин средней и большой мощности. Один из основных объектов работ по 1-ому этапу является агрегат ГТЭ-65. ГТЭ-65 – высокотемпературная газовая турбина со средне-массовой температурой газа на входе в турбину 1368 °С.

Применение охлаждения приводит к снижению КПД ГТУ в целом из-за снижения КПД турбины и потерь цикла на сжатие и прокачку охлаждающего воздуха. На рис. 1 показан анализ влияния величины расхода в отборе охлаждающего воздуха на экономичность ГТУ на примере газотурбинной установки среднего класса мощности ГТЭ-65 [2].

В первой ступени турбины ГТЭ-65 установлено 46 сопловых лопаток с термозащитным покрытием (ТЗП) – пористый ZrO толщиной 0,5 мм. Лопатки имеют конвективно-плёночную схему охлаждения с пористой вставкой в первой полости, ориентированной на спинку.

Давление торможения для потока газа равно $P^* = 14,9$ бар. Параметры воздуха на входе в систему охлаждения: $P_B = 15,8$ бар, $t_B = 422$ °С.

Лопатка является двухполостной. В переднюю полость охлаждающий воздух подается со стороны корневой полки. Из этой полости воздух выходит на наружную поверхность через 12 рядов перфорации, объединенных в 7 групп (рис. 2). Отметим, что в зоне собственно входной кромки

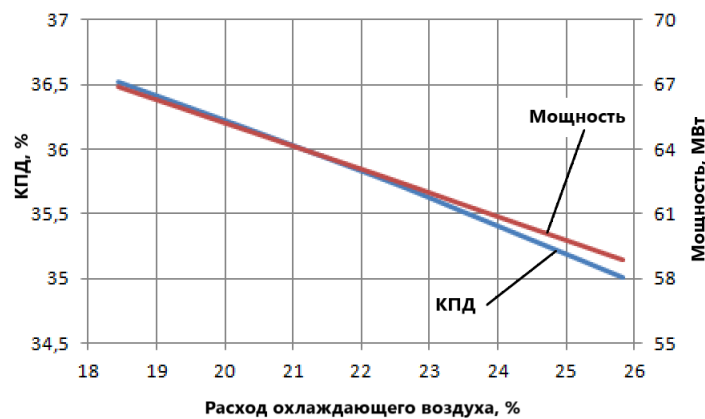


Рис. 1. Влияние расхода охлаждающего воздуха на все ступени турбины на экономичность ГТЭ-65

Fig. 1. The effect of cooling air flow in all turbine stages on the efficiency of GTE-65



Рис. 2. Распределение глубины охлаждения вдоль профиля сопловой лопатки

Fig. 2. Cooling depth distribution along the nozzle blade profile

предусмотрено 3 ряда отверстий диаметром 1,5 мм, остальные отверстия перфорации передней полости имеет диаметр 0,9 мм.

Во вторую полость лопатки вставлен дефлектор, плотно прилегающий к ребрам. Высота ребер 2 мм, расстояние между ребрами 1,5 мм, толщина ребра 1 мм. Ребра выполнены прерывистыми для интенсификации теплообмена. Коэффициент оребрения стенки лопатки 1,6. Охлаждающий воздух подается в полость дефлектора.

Основной расход воздуха выпускается через отверстия диаметром 2,5 мм, расположенные вблизи внутренней перегородки лопатки (по 25 отверстий с каждой стороны), и раздается в каналы, образованные оребренной стенкой лопатки и стенкой дефлектора. Для снижения температуры воздуха в выходной кромке дефлектора выполнены два ряда отверстий диаметром 1,5 мм по 25 штук в каждом.

За дефлектором полость лопатки загромождена штырьковой матрицей. Диаметр столбиков-турбулизаторов 1,5 мм, шаг по длине щели — 3 мм, шаг по ширине щели — 4 мм. Воздух выпускается через оребренную щель в выходной кромке. Суммарная проходная площадь выходной кромки — 70 мм².

На рис. 2 дано сравнение результатов численного моделирования глубины охлаждения сопловой лопатки (сплошная линия) и опытных данных (треугольники), полученные в работе [3]. По

оси абсцисс рис. 2 указаны номера термопар, уложенные на поверхности сопловой лопатки, и местоположение которых дается на эскизе лопатки внутри рисунка. Анализ представленных данных позволяет заключить о недостаточной глубине охлаждения (меньше 0,6) на корытной части лопатки вблизи ее входной кромки.

Расход охлаждающего воздуха на венец составляет 16,20 кг/с (9,0%). Непосредственно на охлаждение пера лопатки предполагалось подавать 12,60 кг/с (7,0%) охлаждающего воздуха, а 3,60 кг/с (2%) — на пленочную завесу корневой и периферийной полок первых направляющих лопаток (по 1% охлаждающего воздуха на каждую).

Оптимизация системы охлаждения лопатки турбины

Большинство работ по оптимизации течения и теплообмена в проточных частях газовых турбин посвящено поиску оптимальных аэродинамических характеристик, в частности, обеспечения минимальных потерь кинетической энергии [4]. Для этого необходимо объединить математические модели и программные комплексы с методами поиска наиболее эффективных решений в рамках оптимизационной среды [5].

К числу наиболее перспективных методов поиска оптимальных решений являются *IOSO*-технологии [6, 7]. В процессе оптимизации в *IOSO* на каждой итерации осуществляется построение поверхностей отклика критериев оптимизации и ограничиваемых параметров.

В работе [8] рассмотрена оптимизация профильной части лопаток компрессора низкого давления (КНД) с использованием газодинамического решателя (*ANSYS CFX*) и программы-оптимизатора (*IOSO PM*). В [9] оптимизационное исследование было направлено на повышение угла поворота потока в лопаточном венце и минимизация потерь полного давления. Процесс оптимизации проводился путем интеграции *CAD* и *ANSYS CFX* кодов с программным продуктом многокритериальной оптимизации *IOSO NM*.

Оптимизация конвективно-пленочной системы охлаждения сопловой лопатки в целом представляет собой сложную задачу ввиду многокритериального и многопараметрического характера и необходимости компромисса между тепловыми, гидравлическими и прочностными характеристиками.

Конвективно-пленочная система охлаждения представляет собой многорядную систему отверстий перфорации, в зависимости от уровня температуры газа, охватывающую либо наиболее важные и теплонапряженные участки профиля (входная кромка лопатки), либо всю поверхность профиля.

Многопараметрический и сопряженный характер взаимодействия газодинамических и тепловых процессов, имеющий место при обтекании профиля охлаждаемой лопатки, приводит к тому, что решение задачи оптимизации представляет собой значительные трудности. На выбор геометрических и режимных характеристик системы охлаждения накладываются серьезные ограничения, связанные с влиянием параметров охлаждающего воздуха во внутренней полости лопатки на режим течения завесы из отверстий перфорации.

В целом, под оптимизацией системы охлаждения понимают поиск такой схемы выдува, при которой требуемый уровень температуры стенки достигался бы при наименьшем суммарном расходе охладителя [10].

В настоящей работе постановка задачи оптимизации сводится к следующему: по заданной глубине охлаждения при варьировании двух независимых параметров (шаг системы перфорации и диаметр отверстия) определяются значения параметров, при которых достигается наименьшее значение относительного расхода охладителя.

Целью работы является повышение эффективности конвективно-пленочной системы охлаждения сопловой лопатки энергетической газовой турбины на основе единой информационной среды, включающей математическую модель, программу расчета глубины охлаждения лопатки и метода поиска оптимального решения, заложенного в программе *IOSO NX GT 2.0* [6].

Математическая модель, алгоритм и программа расчета глубины охлаждения

Математическая модель для расчета температуры поверхности лопатки основана на рассмотрении теплопередачи через перфорированную пластину, которая является элементом поверхности лопатки, и учитывает выдув системы струй из отверстий перфораций (рис. 3 а, б).

На рис. 3 введены следующие обозначения: T_G , T_C – температуры горячего газа и охлаждающей жидкости соответственно; T_{AW} – температура смеси (*fluid*) на стенке при наличии пленочного охлаждения; h_0 и h_f – коэффициенты теплопередачи до и после пленки на верхней поверхности пластины; h_w – коэффициент теплопередачи на нижней поверхности, U_z – скорость газа; d – диаметр отверстия; P – шаг перфорации.

Коэффициент теплоотдачи при выдуве завесы записывается аналогично условиям обтекания пластины сверхзвуковым потоком

$$q_w = h_f (T_{AW} - T_w). \quad (1)$$

В этом случае классическая запись коэффициента теплоотдачи, как $q_w = h(\theta)(T_G - T_C)$, будет зависеть от безразмерной температуры стенки $\bar{\theta} = \frac{T_G - T_C}{T_G - T_w}$ и эффективности пленочного охлаждения $\eta = \frac{T_G - T_{AW}}{T_G - T_C}$:

$$h(\theta) = h_f (1 - \bar{\theta} \cdot \eta). \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи h_f зависит от восьми параметров и его эмпирическое выражение записывается с помощью алгебраических формул, представленных в работе [11, 12]:

$$h_f = (\theta, M, DR, Tu, \alpha, P/d, L/d, x/d), \quad (3)$$

здесь M – параметр вдува, DR – отношение плотностей основного и вторичного потоков, Tu – степень турбулентности основного потока, α – угол выдува завесы, $\bar{P} = P/d$ – относительный шаг между отверстиями перфорации (d – диаметр отверстия), x/d – безразмерная продольная координата, L/d – безразмерная длина подводящего канала.

Для эффективности пленочного охлаждения $\eta = \eta(M, DR, Tu, \alpha, P/d, x/d)$ в работе [13, 14] предложена эмпирическая зависимость, которая зависит от шести параметров и дается с помощью 20 алгебраических выражений.

Глубина охлаждения для перфорированной стенки с учетом термических сопротивлений теплопроводности плоской стенки и ТЗП записывается в виде

$$\theta = \frac{\eta \cdot \left[\psi + \frac{h_f}{h_0} \cdot (1 + \psi Bi_2) \right]}{\left[\psi + \frac{h_f}{h_0} \cdot (1 + Bi_2 \psi) - (1 - \eta) \cdot (1 + \psi + \psi Bi_1) \right]}, \quad (4)$$

здесь $\psi = h_w/h_0$ – коэффициент, учитывающий интенсификацию теплообмена при “сливе” охладителя внутрь отверстия; $Bi_1 = h_0 \frac{\delta_w}{\lambda_w}$ – число Био стенки; $Bi_2 = h_0 \left(\frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{\delta_{ТЗП}}{\lambda_{ТЗП}} \right)$ – число Био с учетом ТЗП.

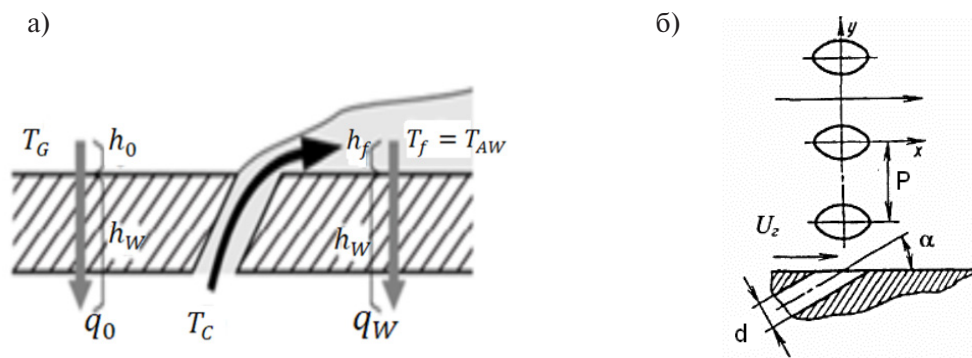


Рис. 3. Теплопередача через перфорированную пластину (а); параметры системы перфораций (б)
Fig. 3. Heat transfer through a perforated plate (a); parameters of the perforation system (b)



Рис. 4. Блок-схема единой информационной среды для расчета оптимальных параметров системы охлаждения сопловой лопатки

Fig. 4. Block diagram of a unified information environment for optimal parameters calculation of the cooling system of the nozzle blade

Для решения поставленной задачи создана единая информационная среда, которая объединяет математическую модель, реализованную с помощью программы *OPTIMA*, и оптимизатор *IOSO NX GT 2.0* (рис. 4). Это позволяет проводить поиск глобального экстремума при взаимном влиянии друг на друга (до пяти) независимых параметров.

Программа *OPTIMA* написана автором работы на языке *FORTRAN*, в которой предусмотрена следующая последовательность действий:

- 1) Задание геометрии: высота лопатки, число лопаток в решетке, число отверстий перфорации по высоте лопатки, шаг между отверстиями, диаметр отверстия.
- 2) Задание свойств газа (показатель адиабаты, газовая постоянная).

- 3) Задание давления и температуры торможения горячего газа на входе в сопловую решетку.
 - 4) Задание параметров газовой завесы: угол выдува, отношение плотностей газа и охладителя, степень турбулентности газа, местоположения завесы на профиле, безразмерная длина подводящего канала охладителя.
 - 5) Определяются числа Био на основании свойств металла лопатки и теплозащитного покрытия.
 - 6) Программа работает со значением давления для выбранного пояска перфорации, которое выбирается по эпюре давления вдоль профиля лопатки [3].
 - 7) Проводится расчет параметра вдува пленки.
 - 8) Проводится расчет эффективности пленочного охлаждения.
 - 9) Проводится расчет безразмерного коэффициента теплоотдачи при наличии пленочного охлаждения.
 - 10) Определяется коэффициент интенсификации теплообмена, учитывающий вихреобразование на входе подводящего канала [15].
 - 11) Рассчитывается глубина охлаждения по формуле (4) и относительный расход охладителя.
- Для стыковки программы *OPTIMA* с оптимизатором необходимо получение исполнительного файла с расширением *.exe* путем компиляции программы и введения двух дополнительных файлов, содержащих входные и выходные данные (с расширением *.txt*).
- Верификация комплекса программ, представленных на рис. 4, проводилась путем сравнения результатов расчетов с точным решением для оптимального значения степени повышения давления для цикла Брайтона [1]. При этом неопределенность не превышало 0,1 % при использовании единой информационной среды, включающий оптимизатор IOSO, в случае отношения температур $\frac{T_3}{T_1} = 5$, где T_3 – температура на выходе из камеры сгорания, T_1 – температура на входе в компрессор и относительных внутренних КПД компрессора и турбины, равных соответственно 0,85 и 0,90.

Результаты расчетов и их анализ

На рис. 5 представлена гистограмма, на которой приведено сравнение исходных расходов охладителя (неоптимизированных) с новыми значениями, полученными из условия минимума относительного расхода охладителя, при задании глубины охлаждения, равного 0,65 (или 0,5), для каждого пояска перфорации.

Рис. 6 подчеркивает, что снижение суммарного относительного расхода охладителя с 7% до 6% (при глубине охлаждения 0,65) достигается за счет увеличения диаметра отверстий, что особенно заметно на корытной стороне лопатки.

Со стороны спинки для поясков (№ 1 – № 5) (см. рис. 2) увеличение диаметра отверстия происходит незначительно (не более 20%). На входной кромке лопатки (№ 6 – № 8) при новом варианте системы охлаждения происходит перераспределение диаметров отверстий: увеличение с 1,5 мм до 2,42 мм для отверстия, примыкающего к корыту, и уменьшение с 1,5 мм до 1,35 мм со стороны спинки.

На корытной части профиля увеличение диаметра отверстия имеет место для поясков перфорации № 9 – № 12, где диаметр отверстия возрастает более, чем в два раза по сравнению с исходным вариантом. Пояски 13 и 14 на вогнутой стороне лопатки вблизи задней кромки характеризуются небольшим увеличением диаметра (с 0,9 мм до 1,25 мм).

Снижение потребного относительного расхода охладителя (до 6%) для достижения средней глубины охлаждения, равное 0,65, можно объяснить двумя причинами. Во-первых, при возрастании диаметра отверстия уменьшается зазор между соседними отверстиями, что приводит к формированию более сплошной пелены по высоте лопатки; во-вторых, при “сливе” потока в

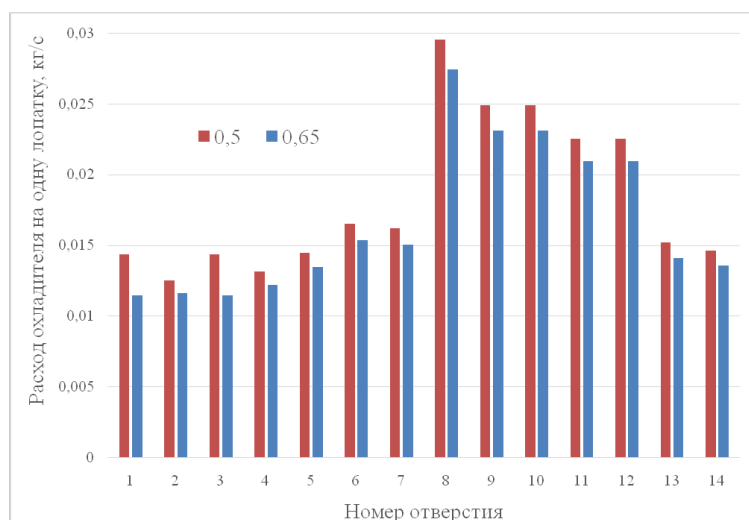


Рис. 5. Сравнение результатов при различной глубине охлаждения
Fig. 5. Comparison of results at different cooling depths

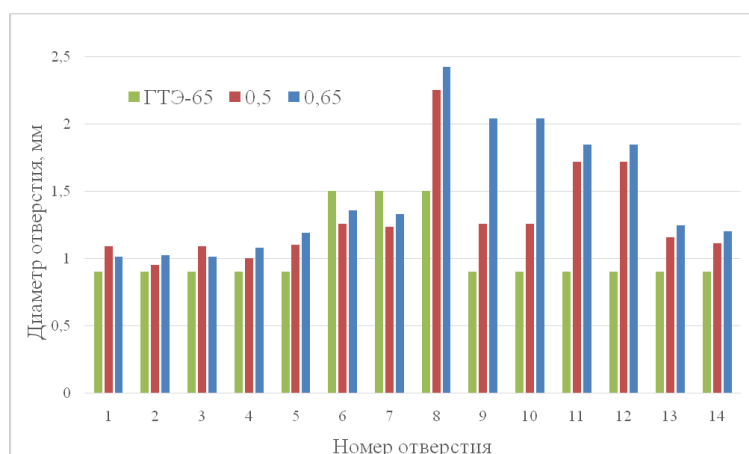


Рис. 6. Распределение диаметров отверстий вдоль профиля лопатки
Fig. 6. Distribution of hole diameters along the blade profile

круговое отверстие наблюдается натекание воздуха на наветренную сторону отводного канала с последующим формированием двух вихрей внутри него [15].

Закключение

Проведена оптимизация системы конвективно-пленочного охлаждения сопловой лопатки первой ступени ГТУ на основе единой информационной среды с включением в нее эффективного метода, использующего поверхность отклика, алгоритм непрямо́й оптимизации на основе принципов самоорганизации (*IOSO*). Единая информационная среда содержит математическую модель по расчету глубины охлаждения перфорированной пластины, алгоритм и программу ее реализации, записанную на языке *FORTRAN*.

По результатам оптимизационных расчетов построены гистограммы, с помощью которых проведен сравнительный анализ исходного и нового распределений по отверстиям расхода охладителя, диаметров отверстий выдува и шага системы перфорации.

Показано снижение с 7% до 6% потребного относительного расхода охладителя при вновь полученных распределениях по отверстиям расхода охладителя, диаметров отверстий выдува и шага системы перфорации (при среднем значении глубины охлаждения — 0,65), благодаря чему возможна прибавка мощности ГТУ в 160 кВт.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Петреня Ю.К.** О программе разработки российских газотурбинных технологий. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. № 1. 2019. С. 8–18. DOI: 10.18721/JEST.25101
- [2] **Рохлин В.Е., Кириченко Р.Е., Золотогоров М.С., Бондюгин М.В.** Постановка расчетно-экспериментальных исследований теплогидравлических характеристик охлаждаемых лопаток энергетических газовых турбин. LXVII научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок “Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и парогазовых установок в электроэнергетике РФ”: сборник докладов. г. Санкт-Петербург. 15–16 сентября 2020 г., С. 49–59. <http://www.power-m.ru>
- [3] **Кривоносова В.В., Кортиков Н.Н.** Анализ и совершенствование системы охлаждения сопловой лопатки газовой турбины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 80–90.
- [4] **Лапшин К.Л.** Компьютерная оптимизация паровых и газовых турбин. — СПб.: СПбПУ. 2018. — 200 с. DOI: 10.18720/SPBPU/2/s18-1
- [5] **Панов Д.О., Рис В.В., Смирнов Е.М.** Многокритериальная оптимизация течения и теплообмена в канале с резким поворотом на 180 градусов / Материалы всероссийской научной конференции с международным участием: XI Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике (21–23 октября 2019 г.). СПб.: ПОЛИТЕХ – ПРЕСС, 2019. С. 300–301.
- [6] IOSO NS GT vers. 2.0. IOSO Technology Center. 2001-2003. Moscow. Сигма Технология [Электронный ресурс] / Режим доступа. <http://www.iosotech.com>
- [7] **Egorov I.N., Kretinin G.V., Fedechkin K.S.** Multi-Level robust design optimization fan. Workshop CE-AS. Vrije Universiteit Brussels (VUB). Brussels. Belgium. 2010. Pp. 1–11.
- [8] **Живирихин М.Л., Боровков А.И., Тамм А.Ю., Тихонов А.С.** Оптимизационное исследование профильной части лопаток компрессора низкого давления. LXVII научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок “Научно-технические проблемы широкого применения газотурбинных и парогазовых установок в электроэнергетике РФ”: сборник докладов. г. Санкт-Петербург, 15–16 сентября 2020 г. С. 95–103.
- [9] **Блинов В.Л., Бродов Ю.М., Седунин В.А., Комаров О.В.** Параметрическое профилирование плоских компрессорных решеток при решении задач многокритериальной оптимизации. Известия вузов. Проблемы энергетики, 2015. № 3-4. С. 86–95.
- [10] **Vinogradov K.A., Didenko R.A., Karelin D.V., Remizov A.E.** Optimization of film-cooling holes shape by principal components method and CFD [Электронный ресурс] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014. vol. 5B. GT-2014-26400. 14 p.
- [11] **Baldauf S., Scheurlen M., Schulz A., Wirtig S.** Heat flux reduction from film cooling and correlation of heat transfer coefficients from thermographic measurement at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30181. 1–12 (2002).
- [12] **Kortikov N., Polishuk V.** Optimal Heat Flux Reduction Inside Film Cooled Wall. XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”, A. Beskopylny and M. Shamtsyan (eds.), Lecture Notes in Networks and Systems 247, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_2

[13] **Baldauf S., Scheurlen M., Schulz A., Wirtig S.** Correlation of film cooling effectiveness from thermographic measurements at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30180. 1–14 (2002).

[14] **Kortikov N.** Numerical Optimization of Film Cooling System with Injection Through Circular Holes. In: Murgul V., Pukhkal V. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1259 (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_51

[15] **Кортиков Н.Н., Кузнецов Н.Б., Осокина И.В.** Интенсификация теплообмена в расходной трубе с отсосом воздуха в перфорации: численное моделирование и обобщение расчетных данных. XXVIII Сибирский теплофизический семинар. Сборник трудов. Статья № 058. CD ROM. Новосибирск. 2005. 11 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КОРТИКОВ Николай Николаевич — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: n-kortikov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7569-3492>

REFERENCES

[1] **Yu.K. Petrenya**, O programme razrabotki rossiyskikh gazoturbinnnykh tekhnologiy. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. № 1. 2019. S. 8–18. DOI: 10.18721/JEST.25101

[2] **V.Ye. Rokhlin, R.Ye. Kirichenko, M.S. Zolotogorov, M.V. Bondyugin**, Postanovka raschetno-eksperimentalnykh issledovaniy teplogidravlicheskih kharakteristik okhlazhdayemykh lopatok energeticheskikh gazovykh turbin. LXVII nauchno-tekhnicheskaya sessiya po problemam gazovykh turbin i parogazovykh ustanovok “Nauchno-tekhnicheskiye problemy shirokogo primeneniya gazoturbinnnykh i parogazovykh ustanovok v elektroenergetike RF”: sbornik dokladov. g. Sankt-Peterburg. 15–16 sentyabrya 2020 g., S. 49–59. <http://www.power-m.ru>

[3] **V.V. Krivonosova, N.N. Kortikov**, Analiz i sovershenstvovaniye sistemy okhlazhdeniya soplovoy lopatki gazovoy turbiny//Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 3. S. 80–90.

[4] **K.L. Lapshin**, Kompyuternaya optimizatsiya parovykh i gazovykh turbin. SPb.: SPbPU, 2018. — 200 s. DOI: 10.18720/SPBPU/2/s18-1

[5] **D.O. Panov, V.V. Ris, Ye.M. Smirnov**, Mnogokriterialnaya optimizatsiya techeniya i teploobmena v kanale s rezkim povоротом на 180 gradusov/ Materialy vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem: XI Seminar VUZov po teplofizike i energetike (21–23 oktyabrya 2019 g.). SPb. POLITEKh — PRESS, 2019. S. 300–301.

[6] IOSO NS GT vers. 2.0. IOSO Technology Center. 2001–2003. Moscow. Sigma Tekhnologiya [Elektronnyy resurs]/ Rezhim dostupa. <http://www.iosotech.com>

[7] **I.N. Egorov, G.V. Kretinin, K.S. Fedechkin**, Multi-Level robust design optimization fan. Workshop CE-AS. Vrije Universiteit Brussels (VUB). Brussels. Belgium. 2010. Pp. 1–11.

[8] **M.L. Zhivirikhin, A.I. Borovkov, A.Yu. Tamm, A.S. Tikhonov**, Optimizatsionnoye issledovaniye profilnoy chasti lopatok kompressora nizkogo davleniya. LXVII nauchno-tekhnicheskaya sessiya po problemam gazovykh turbin i parogazovykh ustanovok “Nauchno-tekhnicheskiye problemy shirokogo primeneniya gaz-

oturbinnnykh i parogazovykh ustanovok v elektroenergetike RF”: sbornik dokladov. g. Sankt-Peterburg, 15–16 sentyabrya 2020 g. S. 95–103.

[9] **V.L. Blinov, Yu.M. Brodov, V.A. Sedunin, O.V. Komarov**, Parametricheskoye profilirovaniye ploskikh kompressornykh reshetok pri reshenii zadach mnogokriterialnoy optimizatsii. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki, 2015. № 3–4. S. 86–95.

[10] **K.A. Vinogradov, R.A. Didenko, D.V. Karelin, A.E. Remizov**, Optimization of film-cooling holes shape by principal components method and CFD [Elektronnyy resurs] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014. vol. 5B. GT-2014-26400. 14 p.

[11] **S. Baldauf, M. Scheurlen, A. Schulz, S. Wirtig**, Heat flux reduction from film cooling and correlation of heat transfer coefficients from thermographic measurement at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30181. 1–12 (2002).

[12] **N. Kortikov, V. Polishuk**, Optimal Heat Flux Reduction Inside Film Cooled Wall. XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”, A. Beskopylny and M. Shamtsyan (eds.), Lecture Notes in Networks and Systems 247, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80946-1_2

[13] **S. Baldauf, M. Scheurlen, A. Schulz, S. Wirtig**, Correlation of film cooling effectiveness from thermographic measurements at engine like conditions. In: Proc. ASME. Turbo Expo. 2002. Amsterdam. The Netherlands. GT-2002-30180. 1–14 (2002).

[14] **N. Kortikov**, Numerical Optimization of Film Cooling System with Injection Through Circular Holes. In: Murgul V., Pukhkal V. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1259. (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-57453-6_51

[15] **N.N. Kortikov, N.B. Kuznetsov, I.V. Osokina**, Intensifikatsiya teploobmena v raskhodnoy trube s otsosom vozdukha v perforatsii: chislennoye modelirovaniye i obobshcheniye raschetnykh dannyykh. XXVIII Sibirskiy teplofizicheskiy seminar. Sbornik trudov. Statya № 058. CD ROM. Novosibirsk. 2005. 11 s.

THE AUTHOR

KORTIKOV Nicolai N. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: n-kortikov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7569-3492>

Статья поступила в редакцию 04.08.2021; одобрена после рецензирования 01.12.2021; принята к публикации 03.12.2021.

The article was submitted 04.08.2021; approved after reviewing 01.12.2021; accepted for publication 03.12.2021.

Metallurgy and Materials

Металлургия и материаловедение

Review article

UDC 669

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27407>

S. Patil ✉

G.H. Raisoni College of Engineering and management,
Pune, India

✉ patilsurajpsb@gmail.com

CONSTRAINED GROOVE PRESSING OF ALUMINIUM ALLOYS – A REVIEW

Abstract. Constrained groove pressing (CGP) is a modern process for the formation of ultrafine grain in metallic sheets with high mechanical properties. During CGP, the sheet metal are subjected to repetitive corrugating and straightening under the plane strain deformation condition by utilizing alternate pressing with the asymmetrically grooved dies and flat dies. This leads to an increase in the degree of plastic strain of the sheet metal without changing its original dimensions. CGP can effectively refine the grain structure to a sub-micron level. Materials processed by CGP have a very high strength, high hardness and many other required properties. This review focuses mainly on CGP process technology, especially the number of passes, as well as the study of microstructure changes. Most of the scientific results were obtained experimentally.

Keywords: CGP, Microstructural change, mechanical properties.

Citation:

S. Patil, Constrained groove pressing of aluminium alloys – a review, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 96–105, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27407>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Обзорная статья

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27407>

Сурадж Б. Патил ✉

Колледж инженерии и менеджмента Г.Х. Райзони,
Пуна, Индия✉ patilsurajpsb@gmail.com

НАПРЯЖЕННОЕ ГОФРИРОВАНИЕ ПРЕССОВАНИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ – ОБЗОР

Аннотация. Гофрирование в напряженном состоянии прессованием (НГП) – это современный процесс растягивания сверхмелких зерен в листовых металлических структурах для получения хороших свойств материалов. При НГП образец листового металла подвергается циклическому рифлению и выпрямлению в условиях плоской деформации при помощи поочередного обжатия между парами пресс-форм – с ассиметричными пазами и плоскими пластинами. Это приводит к увеличению пластической деформации в образце листового металла без изменения его первоначальных размеров. НГП способно значительно измельчить зернистую структуру до субмикронного уровня. Материалы, полученные посредством НГП, обладают крайне высокими значениями прочности, высокой твердостью и многими другими полезными свойствами. Данный обзор, в основном, сосредоточен на процессе НГП и микроструктурных изменениях относительно числа обжатий при НГП. Большинство научных результатов было получено на практике.

Ключевые слова: гофрирование в напряженном состоянии прессованием (НГП), микроструктурные изменения, механические свойства.

Для цитирования:

Сурадж Б. Патил. Напряженное гофрирование прессованием алюминиевых сплавов – обзор // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 4. С. 96–105. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27407>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Introduction. Upgrading the mechanical properties of metals and their alloys has drawn increasing interest from materials scientists over several decades to respond to the growing demand from such areas as automotive, aerospace and military industries. Manufacturing metals and their alloys with ultra-fine grain (UFG) structures is one of the approaches used to enhance mechanical properties and increase the strength-to-weight ratio, which will again enable the material weight required for a certain strength value in an application to be reduced. This property is highly significant, mainly in the transportation system industry, where the reduction in fuel consumption and the resulting pollution both are prioritized. Two methods are used to produce UFG materials: bottom-up and top-down approaches. The bottom-up approach is not suitable for industrial manufacturing as this process gives a porous structure, while the top-down approach will give a bulk structure material that could be widely used in many applications. Severe plastic deformation (SPD) is a very effective technique to manufacture UFG materials via the top-down approach [1].

Several methods of SPD have been introduced in last decades for bulk as well as sheet metal deformation to enhance the mechanical properties of metallic materials by producing UFG structures. Accumulative roll bonding (ARB), asymmetric rolling (ASR), cryorolling, repetitive corrugation and straightening (RCS), constrained groove rolling (CGR) and constrained groove pressing (CGP) are used to manufacture sheet-shaped materials [2]. Among these methods, CGP is the most versatile method for manufacturing

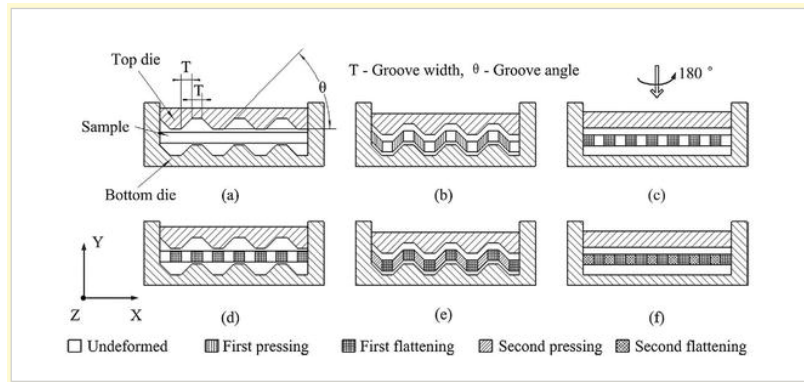


Fig. 1. Schematic of constrained groove pressing (CGP)

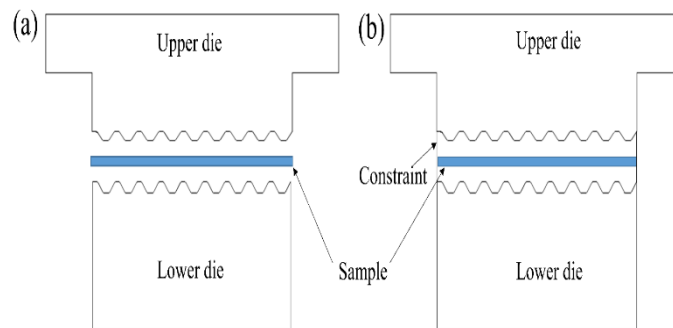


Fig. 2. Repetitive corrugating and straightening (a), and constrained groove pressing (b)

of sheet metals with a UFG structure and that is why it has outstanding, unique and desirable properties. Constrained groove pressing (CGP) is a promising route to produce the UFG structure without changing the overall dimensions of the samples. The authors in [3] initially developed a constrained groove pressing technique in which a sheetmetal is subjected to repetitive shear deformation under plane strain condition. The schematic illustration of the CGP process is presented in Fig. 1.

In the CGP process, a blank is subjected to repetitive shear deformation by deforming the specimen alternately between asymmetrically aligned grooving and flattening dies under plane strain condition. Each pass consists of four stages, two in a grooving die and two in a straightening die. In this technique, the gap between the upper die and the lower die is identical to the sample thickness, and therefore, during the grooving operation, the inclined part located in the groove is subjected to pure shear deformation with an effective plastic strain of 0.58 [4]. In the straightening operation, the deformed regions are subjected to a reverse shear deformation resulting in another effective strain of 0.58 in the reverse direction, causing a total effective strain of 1.16 in the deformed regions [5]. After the second stage, the specimen is rotated by 180° around the axis perpendicular to the sheet plane, as shown in Fig. 1. This allows the undeformed regions to be deformed by further pressing due to the asymmetry of the grooved die, and finally, after the second straightening step, an overall uniform strain of 1.16 is imposed throughout the specimen [6].

Advantages of CGP:

- More homogeneous strain distribution without changing the dimensions of the sample.
- The CGP process is not limited to specific materials and can be used for microstructural refinement in a wide range of metallic materials.
- Fabrication of dies is very simple when compared to some other SPD processes like ECAP.

Limitations of CGP:

- It is a highly discontinuous process owing to a number of stages required for corrugating and flattening.

- The maximum strain that can be achieved by this process is less than other SPD processes.

In the CGP process, the gap between the upper die and the lower die is equal to the thickness of the material resulting in pure shear deformation in the inclined groove region. In CGP, it is possible to impart a larger plastic strain compared to other SPD techniques in sheet metal processing. CGP is almost equivalent to the process of repetitive corrugating and straightening (RCS) except that the material is constrained from expanding laterally in all directions, leading to better homogeneity of material properties. Fig. 2 shows the schematic difference between RCS and CGP.

Microstructural Changes

Constrained groove pressing is one of the severe plastic deformation routes, which refines the grain size of the sheet materials to the sub-micrometer range that can even extend up to the nanometre range. The microstructural refinement that takes place during the CGP process is an important phenomenon to understand the mechanical behaviour of sheet materials. Zrnik et al. [7] investigated the CGP of a commercially pure Al plate. The microstructures obtained from the transmission electron microscopy (TEM) analysis are shown in Fig. 3. The microstructure after the first pressing revealed elongated grains with a banded structure (Fig. 3a). Polygonized subgrains with dislocation cells were found within the banded microstructure, and it was due to local adiabatic heat generated at shear deformation. The authors observed that the microstructure after four passes was similar to that of the first pass (Fig. 3b), which is due to the dynamic recovery and polygonization in the deformed structure. The study also revealed equiaxed subgrains with an average grain size of $1\mu\text{m}$ after four successive passes (Fig. 3c).

Variation of grain size with respect to CGP pass number for different metals and alloys reported by different researchers [8–10] is shown in Fig. 4. Significant grain refinement was observed after the first pass in all the materials, which is similar to other SPD processes [11]. After the first pass, further grain refinement became insignificant at higher strain due to dislocation annihilation through dynamic recovery. Khakbaz and Kazeminezhad [12] showed that it is possible to produce ultrafine-grained sheets by using the CGP technique and studied its effect on mechanical properties. They observed that, after a sudden drop in grain size through first and second passes, the grain refinement became insignificant after the third pass, and the grain size was approximately constant after the fourth pass with a steady-state microstructure. The rate of refinement was reduced due to dynamic recovery.

This trend is consistent with observations in other SPD processes, such as ECAP [13] and ARB [14] carried out on an Al-Mn alloy. Yadav et al. [15] systematically studied the microstructural inhomogeneity in a Cu-Zn alloy sheet deformed by CGP. They showed that the non-uniformity in the microstructure and mechanical properties is mainly due to the strain inhomogeneity generated in the CGP sample. The additional bending strain generated at the intersection of the two grooves was the prime cause of the inhomogeneous microstructure in the CGP sample. The microstructure analysed by EBSD for one pass of the CGP sample is shown in Fig. 5. A larger number of fine grains have been observed in the sample after the first pass compared to the initial sample.

The initial microstructure (Fig. 5a) was homogeneous throughout the sample, while there was a drastic change in the microstructure after the first pass (Fig. 5b). It clearly showed that regions with finer grains deformed more than the other regions.

Lee and Park [16] observed that a single pressing in CGP of pure Al resulted in the formation of a heterogeneous microstructure consisting of equiaxed grains and elongated subgrains or dislocation cells. Though the cell refinement after the first pressing was insignificant, the microstructure became relatively homogeneous after two pressings with equiaxed cells of $0.5\mu\text{m}$.

It was also observed that the grain refinement continued up to six pressings but the grain size after the sixth pressing was only slightly smaller than that after two pressings. This is consistent with the fact that

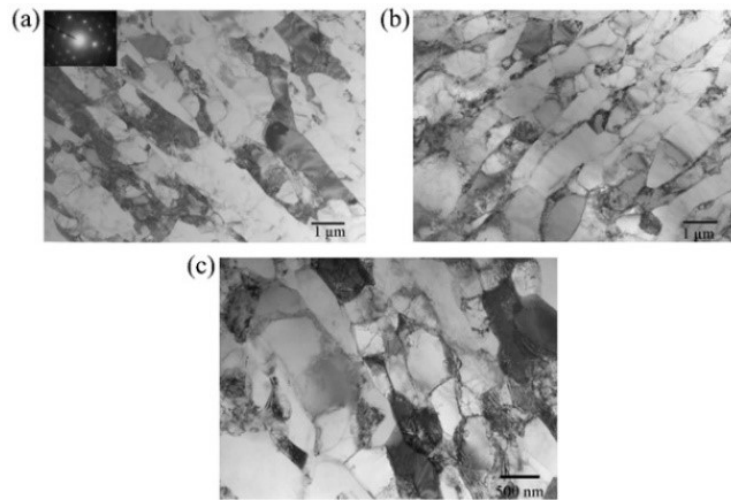


Fig. 3. TEM images of pure aluminium deformed by CGP after first pressing (a), first pass (b), and four passes (c) [7]

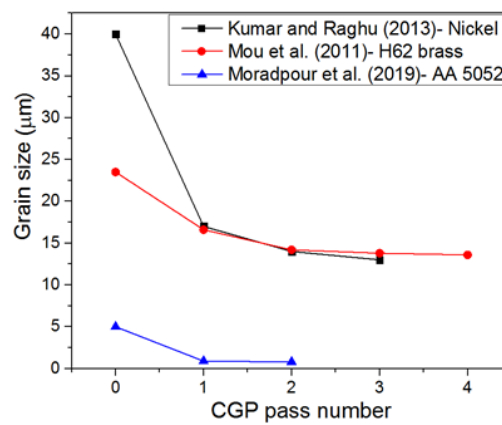


Fig. 4. Variation of grain size with CGP pass number for different materials

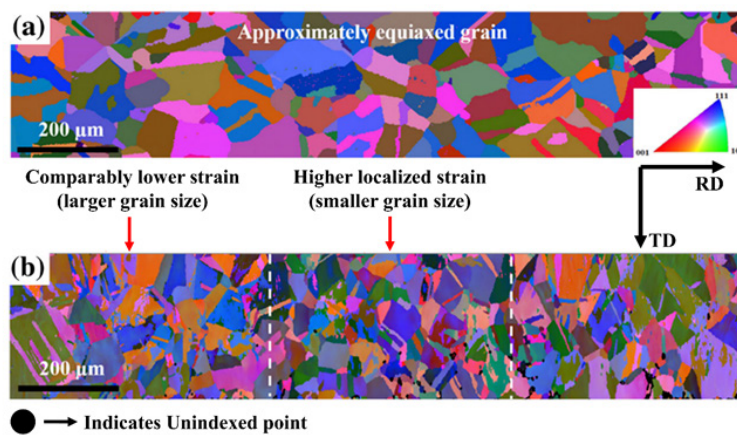


Fig. 5. Microstructure of CGP processed Cu-Zn alloy: initial sample (a) and after first pass (b) [15]

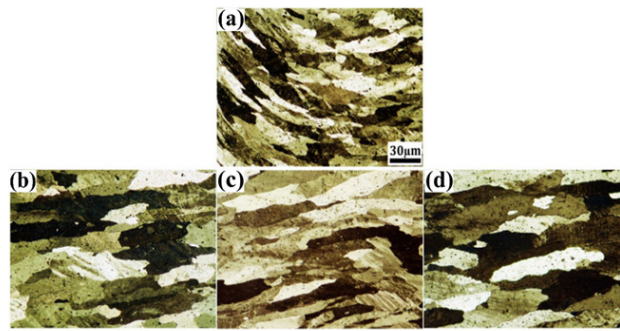


Fig. 6. Optical microstructure of Al-Mn-Si alloy in different conditions: two-pass CGP (a), annealed at 150 °C (b), annealed at 250 °C (c), and annealed at 350 °C (d) [17]

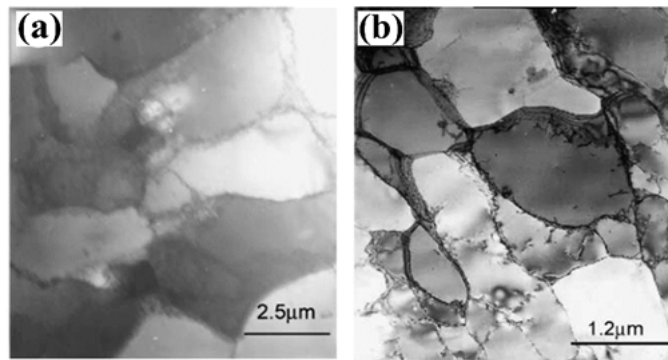


Fig. 7. TEM micrographs of pure aluminium after (a) four CGP passes and (b) annealing at 150 °C [18]

grain refinement gets saturated with the increase in strain. After a few passes, the microstructure consisted of dislocation-free polygonised grains with clear grain boundaries, but the grain size increased to 0.8 μm, which was higher than the grain size after six pressings. Some researchers investigated the effect of post deformation annealing on CGP processed sheets. Fig. 6 shows the optical microstructures of an Al-Mn-Si alloy after two passes of CGP and subsequent annealing at different temperatures [17]. The microstructure after two passes of CGP showed a wavy structure with the accumulation of dislocations due to grooving die geometry and heavy deformation (Fig. 6a).

Annealing after two passes of CGP allowed the restoration phenomena by releasing stored energy and residual stress. The microstructures after annealing at 150 °C, 250 °C, and 350 °C did not show any major difference. However, thermal recrystallization and possible grain growth were observed after 350 °C. Similarly, Krishnaiah et al. [18] studied CGP of pure Al. They annealed the CGP sample deformed up to four passes at 150 °C and observed that the loss of dislocations resulted in the formation of distinct contrast sub-grains structure, as shown in Fig. 7. However, no drastic change in grain size was observed after annealing compared to the deformed condition.

Mechanical Properties

Understanding the mechanical properties of sheet metals subjected to the CGP process such as strength, ductility, and toughness is important for the sheet metal forming applications. Many researchers investigated the effect of the CGP process on the strength and ductility of different alloys. It is reported that the sheet metals subjected to CGP have superior strength when compared to the initial condition of the sample [2]. The trend in the variation of strength with respect to the number of CGP

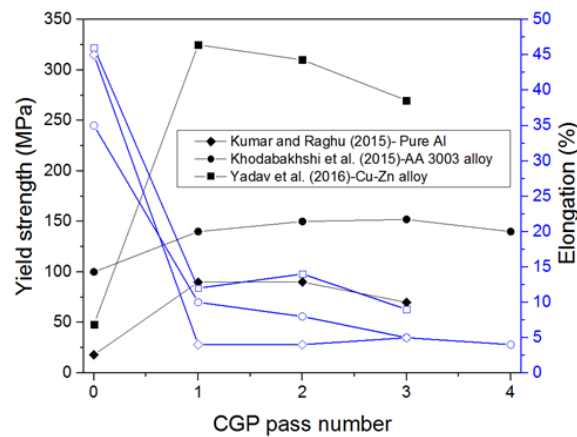


Fig. 8. Variation of yield strength and ductility with CGP pass for different materials [15, 19, 20]

passes is different for different materials. However, strength increases for the initial number of passes (generally two) and then decreases or saturates in the further passes. Fig. 8 shows the variation of mechanical properties (yield strength and ductility) with CGP pass numbers for different materials [15, 19, 20]. It can be observed from Fig. 8 that the trends of yield strength variation in pure Al and Cu-Zn alloy are similar in which the strength increased after the first pass and then decreased during further passes, while in the case of AA 3003 alloy, the strength increased after the first pass and then saturated during second and third passes. Kumar et al. [21] reported similar results in a pure nickel sheet, where marginal strength drop was observed after three passes of CGP along with slight improvement in strain hardening ability and uniform elongation.

It was also found that the role of grain size in strength improvement was more than that of dislocation density because three passes of CGP were found to be enough to obtain good mechanical properties through grain refinement. Krishnaiah et al. [18] deformed pure aluminum by CGP at room and cryogenic temperatures. They observed that the ultimate tensile strength (UTS) increased from 79 MPa to 96 MPa after two passes of CGP at cryogenic temperature, which was reasonably higher than at room temperature deformation in which UTS was observed around 85 MPa after two passes. The higher improvement in strength was mainly due to the suppression of dynamic recovery at cryogenic temperature. The tensile properties of pure Al deformed after CGP at cryogenic temperature were similar to the properties of cryorolled AA 5083 alloy reported previously [22].

Peng et al. [23] deformed H62 brass sample using CGP under partially and fully constrained conditions. The study reported that a partially constrained CGP process reduces the equivalent strain by 40% when compared to the fully constrained condition. However, more deformation occurred in the interior of the CGP sample than the surface region under a fully constrained condition. Khodabakhshi et al. [24] studied the CGP of low carbon steel and concluded that after one pass, inhomogeneity in the sample increased compared to the initial material. In general, the CGP sample exhibits an uneven surface even after repetitive flattening. The surface unevenness is mainly due to repetitive grooving, and hence groove marks are developed on the CGP sample with a rough surface. It is difficult to characterize the mechanical properties and formability of CGP samples due to uneven surface, and it also makes the sheet subjected to CGP unsuitable for subsequent forming applications. In addition to this, CGP leads to non-uniformity in mechanical properties due to strain inhomogeneity and microstructural inhomogeneity. Recently, Kumar et al. [25] studied the inhomogeneity factor (IF) of low carbon steel and commercial aluminum materials deformed by CGP. The inhomogeneity factor is used to quantify non-uniformity in hardness distribution. They observed that IF value is more in commercial aluminum than low carbon steel and showed that more inhomogeneity in the properties of the commercial aluminum.

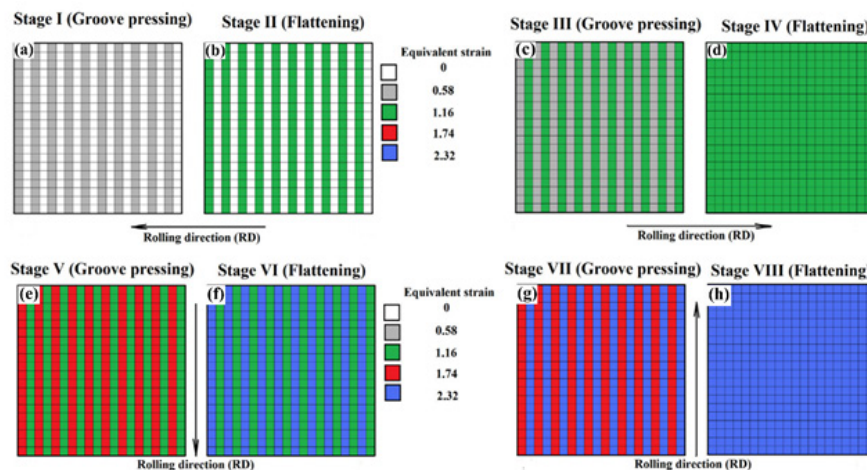


Fig. 9. Eight stages of CGP-CR process for one pass

In the initial two CGP passes, IF value increased, and then it is either consistent or slightly decreased in the remaining passes. In this work, tensile properties were also studied in two different directions by testing samples parallel and perpendicular to the groove. It was observed that strength and elongation of the CGP samples were higher in parallel to the groove than in perpendicular to it.

Khodabakhshi et al. [26] proposed a modified route of constrained groove pressing to improve the homogeneity of the deformed sheets. The proposed route was called constrained groove pressing – cross route (CGP-CR) in which the sheet sample should have a square cross-section, and each pass consists of eight stages – four corrugating and four straightening. Fig. 9 shows the eight stages of the proposed CGP-CR process for one pass. Initially, in the first two stages (Fig. 9a and b), sheet was subjected to grooving and flattening such that the rolling direction of the sample was perpendicular to the groove direction. After two stages, the sheet sample was rotated by 180° around the axis perpendicular to its plane. Now the rolling direction was again perpendicular to the groove but in the opposite direction. In stage III (Fig. 9c) and stage IV (Fig. 9d), the sheet sample was again deformed using grooving and flattening dies, respectively. Until now, the process is similar to the conventional CGP process. After stage IV, the sheet was rotated by 90° such that the rolling direction was parallel to the groove direction and again the four stages were repeated.

These eight stages complete one pass in the CGP-CR process. The major advantage of this process is a high magnitude of plastic strain of about 2.32 imparted in one pass, which is two times higher than that of the conventional CGP process. Peng et al. [9] studied the effect of equivalent strain on the mechanical properties of a brass sheet subjected to multi-pass CGP. The non-uniform distribution of the equivalent strain caused non-uniform distribution of grain size and hardness. The surface region where high equivalent strains were present had finer grains and higher hardness than the interior.

Kumar Gupta et al. [2] have done an extensive review of CGP and explained all the parameters influencing the mechanical properties and microstructure of CGP processed materials. In the CGP process, the interface distance between the grooves and groove width should be equal. Therefore, in the grooving stage, sheet metal is subjected to pure shear deformation [27]. Groove width was equal to the sheet thickness in all the investigations, but the groove angle was different. However, the groove angle of 45° was used in most of the studies. Groove angle is an important parameter that purely depends on the material type. Borhani and Djavanroodi [28] studied the influence of groove angle on the mechanical properties and microstructure of commercially pure aluminum processed by rubber pad-CGP. CGP experiments were carried out using two different dies- one with a groove angle of 45° and another with a groove angle of 50°. CGP dies with 50° angle were more effective in terms of grain refinement and

enhanced strength and hardness. The grain size observed after six passes using a 45° angle and after four passes, using a 50° angle was 842 nm and 833 nm, respectively. Similarly, Sajadi et al. [29] also observed that dies with a smaller groove angle enabled more number of passes. They used two dies with groove angles of 53° and 45° and observed that the die with 45° groove angle allowed four passes while the 53° groove angle die allowed only three passes.

Conclusion

CGP is a severe plastic deformation (SPD) strengthening technique used for sheet metals. It is possible to produce ultrafine-grained sheets by using the CGP technique and its mechanical properties will improve. The sheet metals subjected to CGP have superior strength when compared to the initial condition of the sample. Strength increases for the initial number of passes (generally two) and then decreases or saturates in the further passes.

M238 steel alloy was selected for manufacturing the upper and lower installation plates and die holders, while K110 steel alloy was selected for manufacturing the upper and lower flat and corrugated dies.

REFERENCES

- [1] **A.N. Thangapandian, S. Balasivanandha Prabu**, The Role of Corrugation Die Parameters on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy (AA 5083) Processed by Repetitive Corrugation and Straightening. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 3 (2015), 208–212. DOI: 10.4236/msce.2015.37028
- [2] **A.K. Gupta, T.S. Maddukuri, S.K. Singh**, Constrained groove pressing for sheet metal processing. *Progress in Materials Science*, 84 (2016), 403–462. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.09.008
- [3] **D.H. Shin, J.J. Park, Y.S. Kim, K.T. Park**, Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum, *Mater. Sci. Eng. A* 328 (2002) 98–103.
- [4] **H. Alihosseini, K. Dehghani**, Bake hardening of ultra-fine grained low carbon steel produced by constrained groove pressing, *Mater. Sci. Eng. A* 549 (2012) 157–162.
- [5] **Z.S. Wang, Y.J. Guan, G.C. Wang, C.K. Zhong**, Influences of die structure on constrained groove pressing of commercially pure Ni sheets, *J. Mater. Process. Technol.* 215 (2015) 205–218.
- [6] **S.S. Satheesh Kumar, T. Raghu**, Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique, *Mater. Des.* 57 (2014) 114–120.
- [7] **J. Zrnik, T. Kovarik, Z. Novy, M. Cieslar**, Ultrafine-grained structure development and deformation behavior of aluminium processed by constrained groove pressing, *Mater. Sci. Eng. A* 503 (2009) 126–129.
- [8] **S.S. Satheesh Kumar, T. Raghu**, Mechanical behaviour and microstructural evolution of constrained groove pressed nickel sheets, *J. Mater. Process. Technol.* 213 (2013) 214–220.
- [9] **K. Peng, X. Mou, J. Zeng, L.L. Shaw, K.W. Qian**, The influence of the equivalent strain on the microstructure and hardness of H62 brass subjected to multi-cycle constrained groove pressing, *J. Mater. Process. Technol.* 211 (2011) 590–596.
- [10] **M. Moradpour, F. Khodabakhshi, H. Eskandari**, Dynamic strain aging behavior of an ultra-fine grained Al-Mg alloy (AA5052) processed via classical constrained groove pressing, *J. Mater. Res. Technol.* 8 (2019) 630–643.
- [11] **R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov**, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Prog. Mater. Sci.* 45 (2000) 103–189.
- [12] **F. Khakbaz, M. Kazeminezhad**, Work hardening and mechanical properties of severely deformed AA3003 by constrained groove pressing, *J. Manuf. Processes* 14 (2012) 20–25.
- [13] **S. Ferrasse, V.M. Segal, K.T. Hartwig, R.E. Goforth**, Microstructure and properties of copper and aluminum alloy 3003 heavily worked by equal channel angular extrusion, *Metall. Mater. Trans. A* 28A (1997) 1047–1057.

- [14] **Z.P. Xing, S.B. Kang, H.W. Kim**, Structure and properties of AA3003 alloy produced by accumulative roll bonding process, *J. Mater. Sci.* 37 (2002) 717–722.
- [15] **P.C. Yadav, A. Sinhal, S. Sahu, A. Roy, S. Shekhar**, Microstructural inhomogeneity in constrained groove pressed Cu-Zn alloy sheet, *J. Mater. Eng. Perform.* 25 (2016) 2604–2614.
- [16] **J.W. Lee, J.J. Park**, Numerical and experimental investigations of constrained groove pressing and rolling for grain refinement, *J. Mater. Process. Technol.* 130–131 (2002) 208–213.
- [17] **H. Pouraliakbar, M.R. Jandaghi, G. Khalaj**, Constrained groove pressing and subsequent annealing of Al-Mn-Si alloy: Microstructure evolutions, crystallographic transformations, mechanical properties, electrical conductivity and corrosion resistance, *Mater. Des.* 124 (2017) 34–46.
- [18] **A. Krishnaiah, U. Chakkingal, P. Venugopal**, Production of ultrafine grain sizes in aluminium sheets by severe plastic deformation using the technique of groove pressing, *Scr. Mater.* 52 (2005) 1229–1233.
- [19] **S.S. Satheesh Kumar, T. Raghu**, Strain path effects on microstructural evolution and mechanical behaviour of constrained groove pressed aluminium sheets, *Mater. Des.* 88 (2015) 799–809.
- [20] **F. Khodabakhshi, M. Haghshenas, H. Eskandari, B. Koohbor**, Hardness-strength relationships in fine and ultra-fine grained metals processed through constrained groove pressing, *Mater. Sci. Eng. A* 636 (2015) 331–339.
- [21] **S.S. Satheesh Kumar, T. Raghu**, Tensile behaviour and strain hardening characteristics of constrained groove pressed nickel sheets, *Mater. Des.* 32 (2011) 4650–4657.
- [22] **Y.B. Lee, D.H. Shin, K.T. Park, W.J. Nam**, Effect of annealing temperature on microstructures and mechanical properties of a 5083 Al alloy deformed at cryogenic temperature, *Scri. Mater.* 51 (2004) 355–359.
- [23] **K. Peng, X. Mou, J. Zeng, L.L. Shaw, K.W. Qian**, Equivalent strain, microstructure and hardness of H62 brass deformed by constrained groove pressing, *Comput. Mater. Sci.* 50 (2011) 1526–1532.
- [24] **F. Khodabakhshi, M. Kazeminezhad, A.H. Kokabi**, Constrained groove pressing of low carbon steel: Nano-structure and mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A* 527 (2010) 4043–4049.
- [25] **S. Kumar, K. Hariharan, R.K. Digavalli, S.K. Paul**, Accounting baushinger effect in the numerical simulation of constrained groove pressing process, *J. Manuf. Processes*, 38 (2019) 49–62.
- [26] **F. Khodabakhshi, M. Abbaszadeh, H. Eskandari, S.R. Mohebpour**, Application of CGP-cross route process for microstructure refinement and mechanical properties improvement in steel sheets, *J. Manuf. Processes* 15 (2013) 533–541.
- [27] **G.G. Niranjana, U. Chakkingal**, Deep drawability of commercial purity aluminum sheets processed by groove pressing, *J. Mater. Process. Technol.* 210 (2010) 1511–1516.
- [28] **M. Borhani, F. Djavanroodi**, Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental and finite element investigation, *Mater. Sci. Eng. A* 546 (2012) 1–7.
- [29] **A. Sajadi, M. Ebrahimi, F. Djavanroodi**, Experimental and numerical investigation of Al properties fabricated by CGP process, *Mater. Sci. Eng. A* 552 (2012) 97–103.

THE AUTHOR

PATIL Suraj – *G.H. Raisoni College of Engineering and management.*
E-mail: patilsurajpsb@gmail.com

Статья поступила в редакцию 03.06.2021; одобрена после рецензирования 09.06.2021; принята к публикации 22.11.2021.

The article was submitted 03.06.2021; approved after reviewing 09.06.2021; accepted for publication 22.11.2021.

Научная статья

УДК 661.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>

П.С. Вишняков¹ ✉, Ш. Пэн², М.Ю. Максимов¹

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

² Нанкинский университет авиации и космонавтики,
Нанкин, Китай

✉ vishnyakovpaul@gmail.com

СИНТЕЗ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОПОКРЫТИЙ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ЛИТИРОВАННОГО ОКСИДА ТАНТАЛА

Аннотация. Нанесение нанопокровий между электродами и электролитом является одной из самых многообещающих технологий увеличения безопасности и долговечности твердотельных аккумуляторов (ТЛИА). В статье представлены результаты детального микроскопического и электрохимического анализа многослойных тонких пленок. Исследованные структуры состоят из аморфного слоя Li-O и слоя Ta-O, полученного методом атомно-слоевого осаждения на кремневую и стальную подложки. Было показано, что скорость роста пленок составляет 0,21 нм/суперцикл и соответствует теоретическому при заданных условиях синтеза. По рентгенограмме можно судить, что слои Li-O и Ta-O по структуре рентгеноаморфны с небольшим содержанием нанокристаллитов Ta₂O₅. соотношение компонентов Ta:O в полученных пленках было 1:4, что близко к теоретическому LiTaO₃. Однако смешанных оксидов системы Li-Ta-O и органических остатков прекурсора Ta(OEt)₅ не обнаружено, что говорит о многослойности пленки. Анализ циклических вольтамперограмм показал отсутствие взаимодействия с жидким электролитом в диапазоне потенциалов катода (4,3–3,0 В). Кроме того, покрытия не вносят значительный вклад в электрохимическую емкость, таким образом они могут использоваться в качестве функционального слоя между твердым электролитом и электродами в ТЛИА.

Ключевые слова: атомно-слоевое осаждение, многослойная структура, твердый электролит, функциональный слой, твердотельные аккумуляторы.

Для цитирования:

Вишняков П.С., Пэн Ш., Максимов М.Ю. Синтез и электрохимические характеристики нанопокровий твердого электролита литированного оксида тантала // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 4. С. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>*P.S. Vishniakov¹ ✉, S. Peng², M.Yu. Maximov¹*¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia;² Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing, China✉ vishnyakovpaul@gmail.com

SYNTHESIS AND ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF NANOCOATINGS OF LITHIATED TANTALUM OXIDE SOLID ELECTROLYTE

Abstract. One of the most promising technologies for increasing the safety and durability of solid-state batteries (SSB) is nano-coating between electrodes and electrolytes. The paper presents the results of a detailed microscopic and electrochemical analysis of multilayer thin films. The investigated multilayer structures consist of a two-layer system of an amorphous Li-O layer and a Ta-O layer obtained by atomic-layer deposition on Si and steel substrate. The results show that the growth rate of the films is 0.21 nm/supercycle, which corresponds to the theoretical one under the given synthesis conditions. The X-ray diffraction pattern shows that the Li-O and Ta-O layers are X-ray amorphous with a small content of Ta₂O₅ nanocrystallites. The ratio of the Ta:O components in the films obtained was 1:4, which is close to the theoretical LiTaO₃. However, no mixed oxides of the Li-Ta-O system were found, which indicates that the film is multilayered. Analysis of cyclic voltammograms showed no interaction with liquid electrolyte in the range of cathode potentials (4.3–3.0 V). In addition, the coatings do not significantly contribute to the electrochemical capacity so that they can be used as a functional layer between solid electrolytes and electrodes in SSB.

Keywords: atomic layer deposition, multilayered structure, solid electrolyte, functional layer, solid-state batteries.

Citation:

P.S. Vishniakov, S. Peng, M.Yu. Maximov, Synthesis and electrochemical characteristics of nanocoatings of lithiated tantalum oxide solid electrolyte, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 106–116, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27408>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Развитие электрооборудования привело к появлению целой сети подключенных малогабаритных устройств и объектов, требующих надежных, безопасных и энергоемких источников питания. Твердотельные литий-ионные аккумуляторы (ТЛИА) соответствуют этим требованиям, что объясняется их значительным циклическим ресурсом [1], низким саморазрядом [2], безопасностью использования [3], в отличие от ЛИА с жидкими электролитами. Однако к ТЛИА предъявляется ряд требований. Электролиты в ТЛИА должны быть механически и электрохимически стабильными, иметь минимальное сопротивление интерфейса и обеспечивать идеальный контакт между отдельными слоями аккумулятора [4]. На практике из-за несовершенных систем возникает несколько проблем, таких как проблемы с контактом [5], рост дендритных структур лития на границе с анодом [6], несоответствие кристаллических решеток аккумуляторных ячеек [7], образование взаимной диффузии [8], формирование слоя пространственного заряда [9], иммобилизация Li [10], проблемы тепловыделения [11].

Существуют различные методы улучшения физических контактов в ТЛИА, такие как использование гибридных электролитов и композитных электродов. Реализация таких структур возможна благодаря применению метода молекулярного наслаивания (атомно-слоистого осаждения, АСО) [12]. За счет циклического повторения самоограничивающихся контролируемых реакций газофазного реагента с поверхностью подложки можно обеспечить постоянную скорость роста пленок [13]. Таким образом, пленки, полученные методом АСО, имеют однородный химический состав и необходимую толщину по всей поверхности. Промежуточный слой, сформированный АСО, может увеличить окно электрохимической стабильности электролита без увеличения межфазного сопротивления. Кроме того, структуры покрытий с функцией электролита должны обладать химической стабильностью в отношении металлического лития и поверхности электролита, высокой ионной проводимостью и высоким модулем сдвига [14]. Оксиды металлов (Al_2O_3 , LiTaO_3 , LiNbO_3) являются основными кандидатами из-за хорошего межслойного смачивания, предотвращения образования дендритов лития [15], снижения межфазного сопротивления [16] и подавления образования слоя пространственного заряда [17]. ТЛИА на основе оксидов демонстрирует высочайший уровень безопасности и лучшую термическую стабильность [3].

В качестве реагента для получения оксидов тантала может быть использован этоксид тантала (V) ($\text{Ta}(\text{OEt})_5$), который стандартных условиях представляет собой жидкость с давлением насыщенного пара достаточным для процессов АСО (6 мм рт. Ст. При 190°C) [18]. Кроме того, реагент относительно стабилен при хранении, не разлагается в температурном диапазоне синтеза [19].

Таким образом данной работой посвящена получению и исследованию химического состава, структуры (фазовый состав, плотность тонких пленок, шероховатость), морфологии пленок Li-Ta-O и его электрохимических характеристик.

Методы и материалы

Синтез пленок литированного оксида тантала по методу атомно-слоевого осаждения проводили на установке Picosun R-150 при температуре реактора 300°C . Этоксид тантала (V) ($\text{Ta}(\text{OEt})_5$) и трет-Бутилат лития (LiOtBu) выступали в качестве реагентов для получения монооксидов металлов Ta-O и Li-O, соответственно. Удаленная кислородная плазма использовалась в качестве сореагента (окислителя). Мощность плазмы 3000 Вт, частота 1,9–3,2 МГц, общая длительность импульса плазмы 19,5 с. Для получения пленок твердого электролита были проведены серии экспериментов с соотношениями количества напусков $\text{LiOtBu}/\text{Ta}(\text{OEt})_5$ в суперцикле: 1:2 с параметрами синтеза представлены в табл. 1. Соотношения были выбраны, опираясь на данные работы [18], в которой показано что с увеличением содержания лития в Li_xTaO_y от $x = 0,32$ до 0,98 происходит улучшение литий-ионной проводимости на два порядка, но более высокая концентрация лития ($x = 1,73$) приводит к снижению проводимости.

В качестве подложек для синтеза использовались подложки из монокристаллического кремния (ориентация поверхности (100), 40×40 мм, ООО «Теле-комСТВ», Зеленоград, Россия) и из нержавеющей стали (316SS, диаметр 16 мм, Tob New Energy Technology Co., Ltd., Сямэнь, Китай). Перед синтезом подложки из нержавеющей стали проходили очистку в ультразвуковой ванне, заполненной ацетоном, а затем промывались дистиллированной водой.

Микрофотографии поверхности и поперечных сечений были получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Supra 55 VP (SEM, Zeiss, Оберкохен, Германия) с использованием детекторы вторичных электронов Эверхарта-Торнли и InLens. Пространственное разрешение составляло около 1,3 нм при ускоряющем напряжении 3 кВ. Проводилось исследование трех произвольно выбранных позиции на поверхности образца.

Толщины полученных пленок и расчета роста за цикл (GPC) определялись методом спектроскопическая эллипсометрия. измерения проводились на эллипсометре Ellips-1891 SAG (CNT, Новосибирск, Россия) в диапазоне длин волн $\lambda = 250\text{--}900$ нм (энергия фотонов $E = 1,4\text{--}5,0$ эВ)

и угле падения $\varphi = 70^\circ$. Диаметр пятна зонда составлял 3 мм. Погрешность измерения толщины составляла ± 1 нм.

Таблица 1

Параметры синтеза системы Li-Ta-O

Table 1

Parameters of Li-Ta-O system synthesis

Реагент	Температура испарителя, °C	Время пульса/продувки, с	Температура реактора, °C	Предполагаемая скорость роста, нм
Ta(OEt) ₅	190	1.5/10	300	0,05
LiOtBu	220	3/10	300	0,11

Элементный состав пленок определялся методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) с использованием системы INCA X-Max (Oxford Instruments, High Wycombe, UK) на микроскопе Supra 55 VP.

Фазовый состав пленок определялся методом дифракции рентгеновских лучей (РФА) на дифрактометре Bruker D8 DISCOVER (Cu-K α = 1,5406 Å) с использованием диапазона углов 2θ от 20 до 65° с шагом 0,1° и экспозиции 1 с на каждом шаге. Угол падения первичного рентгеновского пучка составлял 0,7°. Результаты обрабатывались с использованием программного пакета TOPAS (версия 5, Bruker, Billerica, MA, USA)

Для изучения фазового и химического состава по толщине пленки был использован метод рентгеновский фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на спектрометре Escalab 250Xi (Thermo Fisher Scientific, Waltham, США) с Al-K α (1486,7 эВ) излучением при давлении 10^{-8} Па. Для получения информации о внутренних слоях осаждаемой пленки проводилось травление Ar⁺ (500 эВ, 90 с).

Для электрохимических исследований использовали пленки, синтезированные на пластине из нержавеющей стали (SS). Литиевая фольга, полиолефиновая пористая пленка 2325 (Celgard, Шарлотта, Северная Каролина, США) и TC-E918 (Tinci, Гуанчжоу, Китай) использовались в качестве противоэлектрода, сепаратора и электролита соответственно. Состав TC-E918 представлял собой 1М раствор LiPF₆ в смеси органических карбонатов. Циклирование проводили в макетах типа CR2032, которые собирали в перчаточном боксе OMNI-LAB (VAC) в атмосфере аргона. Циклическую вольтамперометрию (ЦВА) выполняли с использованием потенциостата PGSTAT302N + (Au-tolab, Утрехт, Нидерланды) в диапазоне 0,01–4,30 В со скоростью сканирования 0,5 мВ/с.

Результаты исследований и их обсуждение

Микрофотографии СЭМ поверхности образца на кремнии свидетельствуют об однородности покрытия без видимых дефектов (рис. 1). Кристаллических структур на поверхности и по объёму пленки не наблюдается.

Пленка системы Li-Ta-O растёт в соответствии с расчётной скоростью 0,21 нм/суперцикл (табл. 2). Стоит отметить, что плёнки имеют небольшую неравномерность по толщине, что скорее всего связано с особенностями роста литиевого реагента.

ЭДС анализ плёнок, находившихся в вакууме и на воздухе, был проведен для исследования стабильности покрытий (табл. 3). После нахождения на воздухе цвет плёнки остался неизменным, внешних признаков сильного гидролиза и/или карбонизации не наблюдалось, что говорит о химической стабильности покрытий при контакте с атмосферой.

При синтезе образцов серии планировалось получения соединения LiTaO₃ или его аналога, в котором соотношение Ta:O = 1:3. По ЭДС анализу соотношение Ta:O в полученных пленках

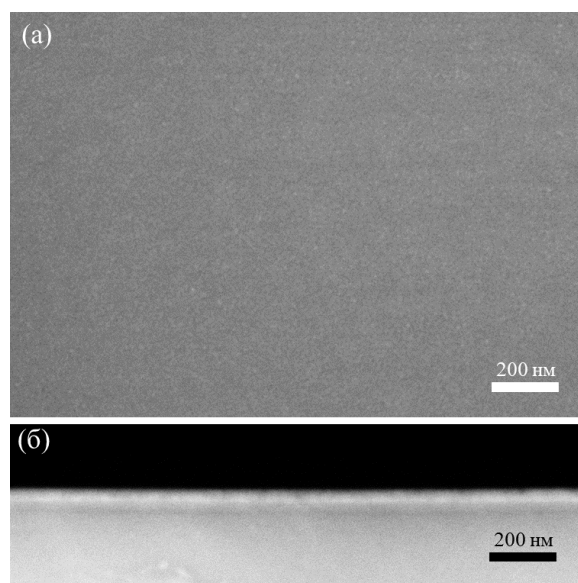


Рис. 1. Микрофотографии СЭМ а) поверхности и б) скола образца

Fig. 1. SEM micrographs of a) a surface and b) a cross-section

было 1:4,5. Избыток кислорода связан с тем, что анализ СЭМ не позволяет детектировать литий, который вероятно так же образует оксиды.

Таблица 2

Параметры роста пленок Li-Ta-O

Table 2

Parameters of Li-Ta-O films growth

Соотношение Li:Ta	Количество суперциклов	Скорость роста, нм/цикл	Скорость роста, нм/суперцикл	Расчетная скорость роста, нм/суперцикл	Средняя толщина по эллипсометрии, нм
1:2	150	0,069	0,21	0,21	30,9

Таблица 3

Химический состав покрытия Li-Ta-O

Table 3

The chemical composition of the Li-Ta-O coating

Элемент	ЭДС		РФЭС
	ат. % (вакуум)	ат. % (воздух)	ат. % (поверхность)
Li	—	—	37,26
O	55,44	60,95	33,28
Si	32,3	26,44	—
Ta	12,26	12,61	2,65
C	—	—	26,80

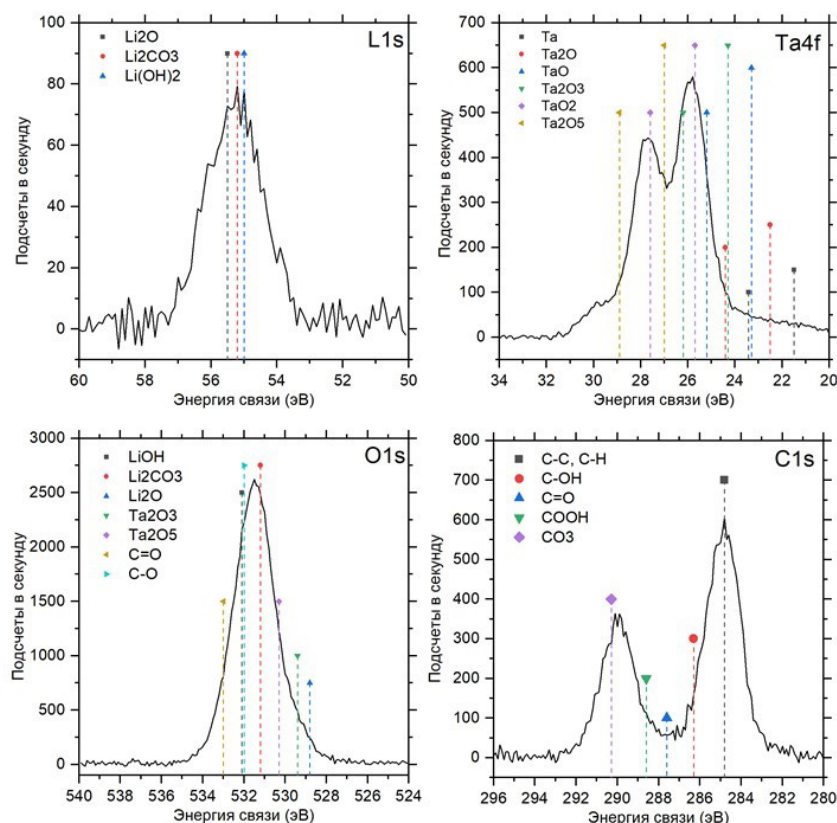


Рис. 2. РФЭС спектры поверхности пленки

Fig. 2. XPS spectra of the film surface

Для более подробного изучения химического состава плёнки были рассмотрены РФЭС спектры поверхности без травливания. На поверхности образца были обнаружены следующие элементы: литий, тантал, кислород и углерод (табл. 3). Углерод присутствует на поверхности в составе соединений, включающих группы C-OH, C-C и C-H, а также C=O связи (плечо пика 284,8 эВ). На 290 эВ имеется пик соответствующий CO_3 . Для спектра O1s виден один несимметричный максимум при 531,5 эВ, который близок к Ta_2O_5 (530,3 эВ). Анализ спектров Ta4f, показал наличие двух интенсивных пиков, положение максимумов которых хорошо совпадают с TaO_2 . Судя по спектрам O1s имеется соединение Ta_2O_5 . Данное несоответствие может быть вызвано сложностями в калибровке положения пиков (компенсации заряда). На спектрах L1s обнаружен широкий максимум в области проявления соединений лития, характеризующий присутствие лития в различных соединениях: Li_2O , Li_2CO_3 , LiOH . Малая интенсивность и соотношение сигнал/шум спектров L1s не позволяют выявить преимущественное состояние.

Рентгенофазовый анализ показал (рис. 3), что полученные пленки рентгеноаморфны, но, возможно, присутствие нанокристаллитов системы Ta-O (слабоинтенсивный пик в районе 27° и 62°, плечо при 33°). Интенсивный пик в районе 33° связан с дефектами кремниевой подложки.

Результаты циклической вольтамперометрии (ЦВА) и циклировании при различных токах разряда представлены на рис. 4. ЦВА кривые серии образцов и покрытий системы Li-Ta-O (рис. 4а) имеют общую тенденцию: в анодной области (3,0–0,1 В) имеются усиления тока, которые, скорее всего, связаны с образованием пенки SEI, а в катодной области потенциалов (4,3–3,0 В), усиления тока не наблюдается.

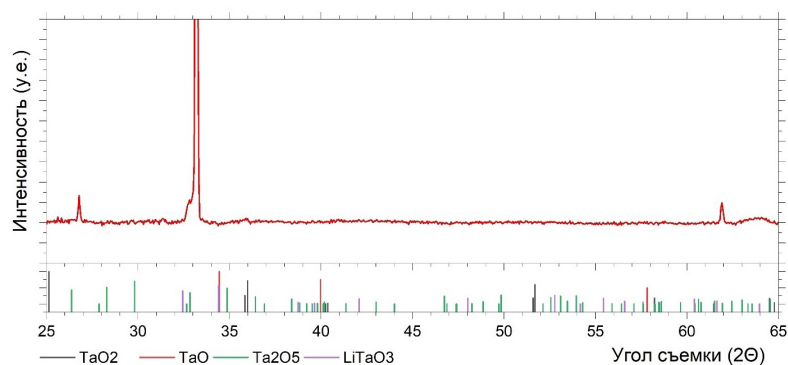


Рис. 3. Дифрактограмма образца Li-Ta-O
Fig. 3. XRD pattern of a Li-Ta-O sample

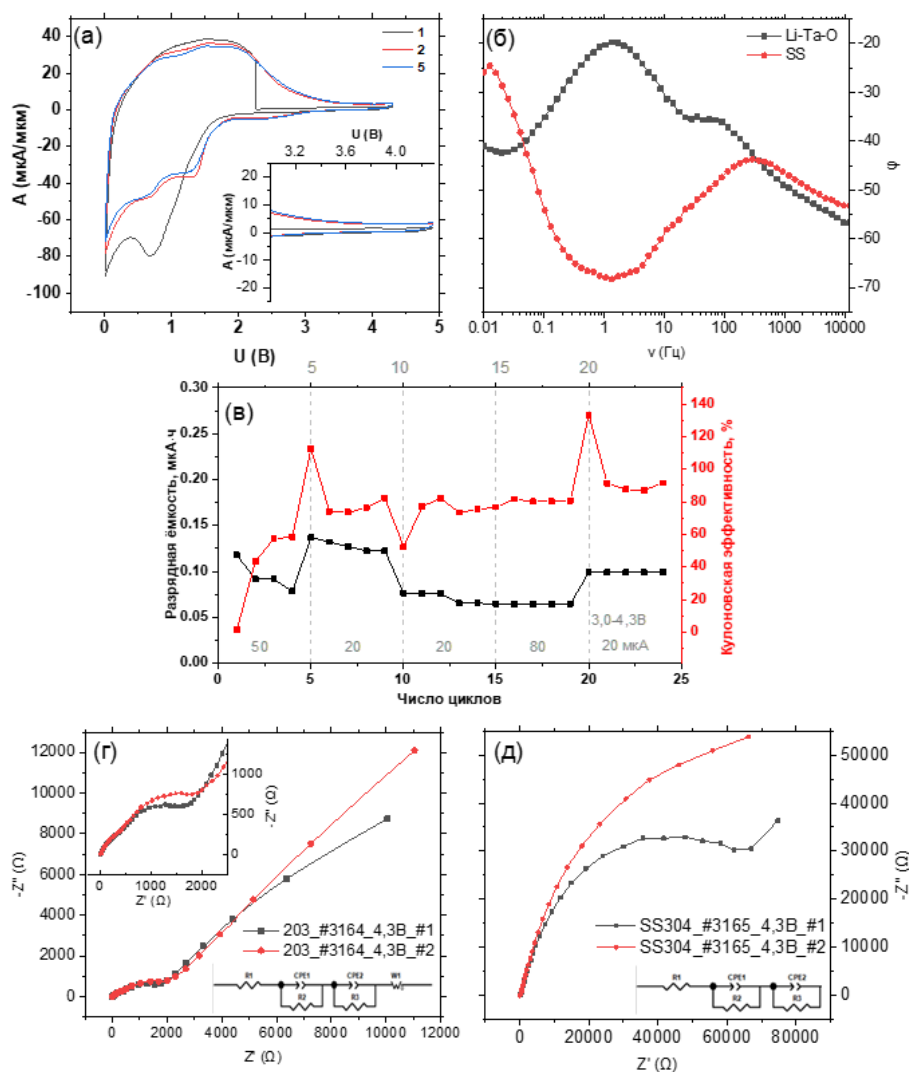


Рис. 4. а) ЦВА кривые; б) Кривые Боде на стальных электродах;
в) результаты циклических испытаний; г-д) диаграммы Найквиста и эквивалентные схемы
Fig. 4. а) CV curves; б) Bode Plot on steel electrodes;
в) the results of cyclic tests; г-д) Nyquist diagrams and equivalent circuits

Дальнейшее циклирование при токах от 20 до 80 мкА в катодной области потенциалов (4,3–3,0 В) показало наличие минимальной емкости 0,13–0,07 мкА·ч, соответственно, которая может быть связана адсорбцией носителей заряда на поверхности (рис. 4в). Таким образом, исследуемые покрытия системы Li-Ta-O не вносят значительного вклада в электрохимическую емкость в катодной области потенциалов, в которой в дальнейшем будут исследоваться тонкопленочные системы катод-твердый электролит.

Измерение импеданса для стальной подложки (SS) и синтезированной пленки (SS+Li-Ta-O) проводилось по двухэлектродной схеме в дисковых макетах CR2032 с литиевым противоэлектродом. Анализ кривых Боде (рис. 4б) показывает, что в высокочастотной области у обоих образцов есть общий пик в диапазоне частот 104–105 Гц, который, скорее всего, относится к процессам, связанным с формированием слоя SEI. Образцы SS имеют дополнительный пик в районе 1 Гц. Для пленок Li-Ta-O характерны два пика в диапазоне 10–100 Гц и 0,01–0,1 Гц, которые соответствуют наличию в этих частотах ёмкостно-резистивных откликов системы. Предполагается, что в исследуемых образцах нет индуктивных откликов (уравнение 1).

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{\omega RC}. \quad (1)$$

Это позволяет отобразить пики с использованием резисторов (R) и ёмкостных элементов (CPE). Для описания систем использовались параллельно соединённые CPE, R и элемент Варбурга (W). Кроме того, в начале добавляется активное сопротивление R1, которое представляет собой сумму омических сопротивлений электродов, электролита, а также корпуса измерительной ячейки. Из кривых Боде можно заключить, что для моделирования SS целесообразно выбрать двухэлементную схему, а для SS+Li-Ta-O – 3-х элементную.

Диаграммы Найквиста и эквивалентные схемы для исследуемых образцов представлены на рис. 4 г,д. Параметры элементов эквивалентных схем исследуемых образцов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры элементов эквивалентных схем

Table 4

Parameters of equivalent circuits elements

	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	CPE1	CPE2
SS+Li-Ta-O	6	400	900	3E-6	8E-06
SS	3	100	0,15E6	2E-05	7,2E-5

Колебания R1 не относятся к исследуемому материалу, поэтому не рассматриваются для анализа. Стоит отметить, что второй элемент эквивалентных схем (CPE1/R2) у каждого из образцов описывает разные процессы, так как пики на диаграмме Боде находятся в разном диапазоне частот. Для пленки твердого электролита второй элемент описывает сопротивление переноса заряда и ёмкость двойного электрического слоя (ДЭС), тогда как на SS подобные процессы идти не могут. Сопротивление R3 для стальных электродов высокое, что говорит о том, что переноса заряда не происходит. Можно предположить, что на стали происходит медленное разложение электролита, и именно этот процесс соответствует второму элементу CPE1/R2.

Сопротивление плёнки SEI (R2) на стали меньше, чем на Li-Ta-O. Это может быть связано с условиями её образования: в то время как Li из покрытия твердого электролита может довольно легко взаимодействовать с электролитом с образованием SEI. Поверхность стали покрыта плотным слоем Cr_2O_3 , который, по-видимому, взаимодействует с электролитом по другому механизму.

Более высокая ёмкость как пленки SEI (CPE1), так и ДЭС (CPE2) для образцов SS может быть связана с большей шероховатостью её поверхности. Поверхность осаждённой пленки литированного оксида тантала имеет меньшую шероховатость и может считаться гладкой по сравнению со стальной поверхностью. В таком случае более шероховатая поверхность будет иметь большую площадь, и, как следствие, большую адсорбционную ёмкость.

Заключение

Исследование пленок твердого электролита системы Li-Ta-O, полученных методами АСО, показало, что рост пленок при заданных условиях соответствует теоретическому и составляет 0,21 нм/суперцикл. Пленки являются рентгеноаморфными с ближним порядком нанокристаллитов, соответствующих структуре Ta₂O₅. Согласно РФЭС смешанных оксидов системы Li-Ta-O в результате синтеза не образуется, так как присутствуют отдельные пики оксидов лития и оксидов тантала. Поверхность пленок однородная с небольшим содержанием соединений углерода. Однако при интегральном анализе элементного состава углеродсодержащих остатков прекурсора Ta(OEt)₅ не обнаружено. Анализ полученных циклических вольтамперограмм нанопленок, нанесенных на стальные подложки, показал, что покрытия в диапазоне потенциалов катода (4,3–3,0 В) не взаимодействуют с жидким электролитом и не вносят вклад в электрохимическую емкость и могут использоваться в качестве твердого электролита ТЛИА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Ma Li J. et al.** Solid Electrolyte: the Key for High-Voltage Lithium Batteries // Advanced Energy Materials. 2014.
- [2] **Fleutot B. et al.** Characterization of all-solid-state Li/LiPONB/TiOS microbatteries produced at the pilot scale // Journal of Power Sources, 2011. 196 (23). Pp. 10289–10296.
- [3] **Chen R. et al.** Approaching Practically Accessible Solid-State Batteries: Stability Issues Related to Solid Electrolytes and Interfaces // Chemical Reviews. 2019.
- [4] **Sakamoto J.** More pressure needed // Nature Energy. 2019. 4 (10), pp. 827–828.
- [5] **Chen R.J. et al.** Addressing the Interface Issues in All-Solid-State Bulk-Type Lithium Ion Battery via an All-Composite Approach // ACS Applied Materials & Interfaces. 2017. 9 (11).
- [6] **Xu L. et al.** Interfaces in Solid-State Lithium Batteries // Joule. 2018.
- [7] **Ma C. et al.** Atomic-scale origin of the large grain-boundary resistance in perovskite Li-ion-conducting solid electrolytes // Energy & Environmental Science. 2014. 7 (5).
- [8] **Sakuda A., Hayashi A., Tatsumisago M.** Interfacial Observation between LiCoO₂ Electrode and Li₂S–P₂S₅ Solid Electrolytes of All-Solid-State Lithium Secondary Batteries Using Transmission Electron Microscopy // Chemistry of Materials. 2010. 22 (3), Pp. 949–956.
- [9] **Yamamoto K. et al.** Dynamic Visualization of the Electric Potential in an All-Solid-State Rechargeable Lithium Battery // Angewandte Chemie International Edition. 2010. 49 (26), Pp. 4414–4417.
- [10] **Chen C. et al.** Origin of Degradation in Si-Based All-Solid-State Li-Ion Microbatteries // Advanced Energy Materials. 2018.
- [11] **Chen R. et al.** The Thermal Stability of Lithium Solid Electrolytes with Metallic Lithium // Joule. 2020. 4 (4), pp. 812–821.
- [12] **Maximov M. et al.** Atomic Layer Deposition of Lithium–Nickel–Silicon Oxide Cathode Material for Thin-Film Lithium-Ion Batteries // Energies. 2020. 13 (9) 2345.
- [13] **George S.M.** Atomic Layer Deposition: An Overview // Chemical Reviews. 2010. 110 (1), P. 111–131.

- [14] **Du M. et al.** Recent advances in the interface engineering of solid-state Li-ion batteries with artificial buffer layers: challenges, materials, construction, and characterization // *Energy & Environmental Science*. 2019. 12(6), Pp. 1780–1804.
- [15] **Jadhav H.S. et al.** Highly stable bilayer of LiPON and B₂O₃ added Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄)₃ solid electrolytes for non-aqueous rechargeable Li-O₂ batteries // *Electrochimica Acta*. 2016. 199, pp. 126–132.
- [16] **Takada K. et al.** Interfacial modification for high-power solid-state lithium batteries // *Solid State Ionics*. 2008. 179 (27–32), pp. 1333–1337.
- [17] **Takada K. et al.** Interfacial phenomena in solid-state lithium battery with sulfide solid electrolyte // *Solid State Ionics*. 2012. 225, pp. 594–597.
- [18] ООО “ЭЛМОС”. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metalorganics.ru/files/PR-ME-R/PR-TA1-R2.htm>
- [19] **Kukli K., Ritala M., Leskelä M.** Atomic layer deposition and chemical vapor deposition of tantalum oxide by successive and simultaneous pulsing of tantalum ethoxide and tantalum chloride // *Chem. Mater.* 2000. Vol. 12, № 7. Pp. 1914–1920.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВИШНЯКОВ Павел Сергеевич — лаборант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: vishnyakovpaul@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4917-6632>

ПЭН Шэнцзе — ведущий научный сотрудник, Нанкинский университет авиации и космонавтики, без степени.

E-mail: pengshengjie@nuaa.edu.cn

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-1301>

МАКСИМОВ Максим Юрьевич — доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.

E-mail: maximspbstu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7870-4751>

REFERENCES

- [1] **J. Ma Li et al.**, Solid Electrolyte: the Key for High-Voltage Lithium Batteries // *Advanced Energy Materials*. 2014.
- [2] **B. Fleutot et al.** Characterization of all-solid-state Li/LiPONB/TiOS microbatteries produced at the pilot scale // *Journal of Power Sources*, 2011. 196 (23). Pp. 10289–10296.
- [3] **R. Chen et al.**, Approaching Practically Accessible Solid-State Batteries: Stability Issues Related to Solid Electrolytes and Interfaces // *Chemical Reviews*. 2019.
- [4] **J. Sakamoto**, More pressure needed // *Nature Energy*. 2019. 4 (10), pp. 827–828.
- [5] **R.J. Chen et al.**, Addressing the Interface Issues in All-Solid-State Bulk-Type Lithium Ion Battery via an All-Composite Approach // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. 9 (11).
- [6] **L. Xu et al.**, Interfaces in Solid-State Lithium Batteries // *Joule*. 2018.
- [7] **C. Ma et al.**, Atomic-scale origin of the large grain-boundary resistance in perovskite Li-ion-conducting solid electrolytes // *Energy & Environmental Science*. 2014. 7 (5).

- [8] **A. Sakuda, A. Hayashi, M. Tatsumisago**, Interfacial Observation between LiCoO₂ Electrode and Li₂S–P₂S₅ Solid Electrolytes of All-Solid-State Lithium Secondary Batteries Using Transmission Electron Microscopy // *Chemistry of Materials*. 2010. 22 (3), pp. 949–956.
- [9] **K. Yamamoto et al.**, Dynamic Visualization of the Electric Potential in an All-Solid-State Rechargeable Lithium Battery // *Angewandte Chemie International Edition*. 2010. 49 (26), pp. 4414–4417.
- [10] **C. Chen et al.**, Origin of Degradation in Si-Based All-Solid-State Li-Ion Microbatteries // *Advanced Energy Materials*. 2018.
- [11] **R. Chen et al.**, The Thermal Stability of Lithium Solid Electrolytes with Metallic Lithium // *Joule*. 2020. 4 (4), pp. 812–821.
- [12] **M. Maximov et al.**, Atomic Layer Deposition of Lithium–Nickel–Silicon Oxide Cathode Material for Thin-Film Lithium-Ion Batteries // *Energies*. 2020. 13 (9), 2345.
- [13] **S.M. George**, Atomic Layer Deposition: An Overview // *Chemical Reviews*. 2010. 110 (1), Pp. 111–131.
- [14] **M. Du et al.**, Recent advances in the interface engineering of solid-state Li-ion batteries with artificial buffer layers: challenges, materials, construction, and characterization // *Energy & Environmental Science*. 2019. 12 (6), pp. 1780–1804.
- [15] **H.S. Jadhav et al.**, Highly stable bilayer of LiPON and B₂O₃ added Li_{1.5}Al_{0.5}Ge_{1.5}(PO₄) solid electrolytes for non-aqueous rechargeable Li–O₂ batteries // *Electrochimica Acta*. 2016. 199, pp. 126–132.
- [16] **K. Takada et al.**, Interfacial modification for high-power solid-state lithium batteries // *Solid State Ionics*. 2008. 179 (27–32), pp. 1333–1337.
- [17] **K. Takada et al.**, Interfacial phenomena in solid-state lithium battery with sulfide solid electrolyte // *Solid State Ionics*. 2012. 225, pp. 594–597.
- [18] OOO “ELMOS”. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.metalorganics.ru/files/PR-ME-R/PR-TA1-R2.htm>
- [19] **K. Kukli, M. Ritala, M. Leskelä**, Atomic layer deposition and chemical vapor deposition of tantalum oxide by successive and simultaneous pulsing of tantalum ethoxide and tantalum chloride // *Chem. Mater.* 2000. Vol. 12, № 7. Pp. 1914–1920.

THE AUTHORS

VISHNIAKOV Pavel S. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: vishnyakovpaul@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4917-6632>

PENG Shengjie — *Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*.
E-mail: pengshengjie@nuaa.edu.cn
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1591-1301>

MAXIMOV Maxim Yu. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: maximspbstu@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7870-4751>

Статья поступила в редакцию 08.11.2021; одобрена после рецензирования 23.11.2021; принята к публикации 09.12.2021.

The article was submitted 08.11.2021; approved after reviewing 23.11.2021; accepted for publication 09.12.2021.

Review article

UDC 620

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27409>

P. Sutar ✉

G.H. Raisoni College of Engineering and management,
Pune, India

✉ sutarpraveen007@gmail.com

A SHORT REVIEW OF VIBRATION ISOLATION USING VARIOUS INSULATING MATERIALS

Abstract. As for the increasing dependability of man on the machine, it seems necessary to strive for improvement of the performance of machines given that the dependent inputs are not changed drastically. In mechanical engineering terms, we are accustomed to working towards increasing the efficiency of a prime mover or core machine setup by developing methods to reduce wastage of energy, and performance reducing factors can be eradicated. In machines vibration is the underlying factor that compiles to carry out periodic maintenance, not working up to the full potential of the prime movers, limiting the working and output of the mechanical forces and thus resulting in reduced performances. This paper provides brief review of the effects vibration has on the performance and how isolating it can result in increased efficiency and performance.

Keywords: Vibration Isolation, Mounting material.

Citation:

P. Sutar, A short review of vibration isolation using various insulating materials, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 117–123, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27409>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Обзорная статья

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27409>

Сутар Правин ✉

Колледж инженерии и менеджмента Г.Х. Райзони,
Пуна, Индия

✉ sutarpraveen007@gmail.com

КРАТКИЙ ОБЗОР ВИБРОИЗОЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. На фоне возрастающей зависимости человека от машины стремление улучшить производительность оборудования кажется необходимостью, так как входные данные не имеют значительных изменений. Если использовать терминологию машиностроения, мы привыкли работать над увеличением эффективности первичного двигателя или стержневой машины путем разработки методов сокращения потерь энергии, а факторы, негативно влияющие на производительность, можно устранить. В станках вибрация является основной причиной необходимости в периодическом техобслуживании, невозможности использовать полный потенциал первичных двигателей, ограничения эксплуатации и выхода механического усилия, что ведет к снижению производительности. В данной работе приводится краткий обзор эффектов, которые вибрация оказывает на производительность, а также описывается то, как виброизоляция может привести к увеличению эффективности и производительности.

Ключевые слова: виброизоляция, монтажный материал.

Для цитирования:

Сутар Правин. Краткий обзор виброизоляции с использованием различных изоляционных материалов // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 117–123. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27409>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Introduction. The unwanted motions of the system are always a nuisance. One of the simplest means to reduce the vibration is to use any vibration-absorbing material. Many materials are widely used for this purpose. Various passive isolation materials include pneumatic isolators, springs and dampers. Flexible materials used as sheets or pads are made of corks, felts, rubber, elastomers, etc. These stated materials are applied on heavy machinery, in building systems and various industrial applications. Flexible materials are used in common household items, vehicles and, in the context of our study, in industrial machinery as well, where they are implemented as mounting pads for the vibrating source and foundations. Using these flexible materials, we can achieve cost cuttings and get the required isolation of vibration [1]. Here, we are focusing on using sandwich pads of 2–3 materials instead of using a single one and study the output parameter transmissibility. We reviewed and sought methods and approaches for isolating the oscillations of the machine and reducing the vibration transmitted to the foundations. Vibration isolation will aim to decrease unnecessary oscillations in the setup. The transmissibility idea is related to a single DOF (Degree of Freedom) system. The focus always lies on using lightweight and low-cost materials with greater results than traditional applications for vibration isolation.

Vibration isolation systems can be classified as active or passive.

Active vibration isolation systems provide the feedback and accordingly provide opposing forces or frequencies to isolate the vibrations. Here, more vibration is found than usual.

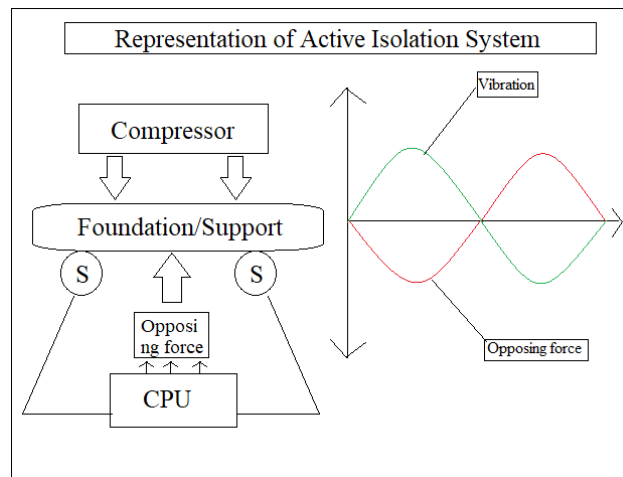


Fig. 1. Schematic representation of active vibration isolator

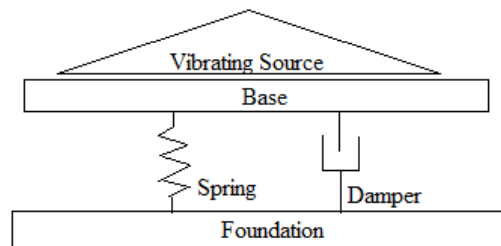


Fig. 2. Schematic representation of passive vibration isolator

Passive vibration isolation uses isolating materials like rubber pads or springs or different isolating materials [4]. We can use sandwiched composites of different materials as well, if there is a need to prepare an amount, which can provide passive isolation of the vibrating source.

Isolation is achieved at frequencies more than the square root of double the mounted resonance frequency. The area to be decided upon is a method to increase the transmissibility of the system.

For vibration isolation, the study aims to check that there is no change or modification in already used supports between vibrating source and foundation: this kind of application will have reduced weight with a possibility of stiffness control as well. Thus, we consider the effect of using such new materials like rubber, felt or copper instead of traditionally used springs and how this will impact the performance by calculating the transmissibility of vibration.

We study and compare various factors like the stiffness of materials used, damping coefficient of the materials, transmissibility of material with and without damping effects of the setup.

Hybrid isolation here stands for as a combination of passive and active types.

Problem statement and objective

The purpose of this study is to determine the vibration caused by a compressor and then to apply passive composite vibration isolators to reduce the transmissibility, i.e. vibration transmitted to the base. The combinations of rubber, felt and cork were used as isolators to reduce the vibration transmitted to the base of the compressor. The vibration is measured with and without an isolator.

Theoretical analysis

Many authors put the vibration isolation problem forth. The most discussed and easiest will be a single DOF system, with dependencies on mass, stiffness and damping. A two DOF (Degree of Freedom)

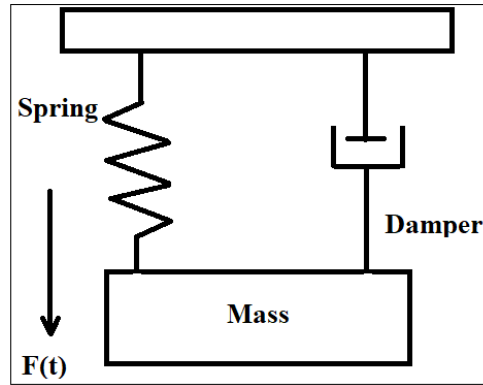


Fig. 3. Schematic diagram of vibration system

system can be devised as giving better-analysed data with fixed inputs [10]. M. Long observed that in both non-linear and linear stability theories, feedback control could be linked to improved stability [1]. Eigenvalues of the system can be used to examine results for stability of these systems and it will be stated if values found are negative.

When the damping or stiffness in the system are controlled, it is said to contain tuneable parameters [11]. Various data are available on diminishing harmonic excitations. Vibration absorbers are widely used to reduce unnecessary disturbances [1].

In this section, we study the calculation using the theoretical method proposed for identifying the effects of vibration isolation on the machine. [2]

Below is the basic equation we use for the calculation of the vibrating system [3]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t), \quad (1)$$

where $x(t)$ – vertical displacement; c – viscous damping; k – stiffness; $F(t)$ – excitation force; m – mass of system [3].

where M -(mass), C -(damping), and K -(stiffness) are matrices, and F (excitation force's vector) [2].

By neglecting the damping, vertical motion occurred in the system [3].

The displacement is as below:

$$x(t) = \frac{Fo/k}{(1-r^2)} \sin \omega t, \quad (2)$$

where

$$r = \sqrt{\frac{\omega}{\omega_n}}, \quad (3)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (4)$$

The system has a natural frequency, here it will give larger amplitudes, for a low force of input.

Natural frequency is as follows:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5)$$

In RPM, critical frequency is as follows:

$$RPM_{critical} = 60 f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (6)$$

The force transmitted is:

$$F = kx. \quad (7)$$

Transmissibility is nothing but transmitted force upon input force.

Transmissibility (T) is as below:

$$T = \left| \frac{F_t}{F_o} \right| = \left| \frac{1}{1-r^2} \right|. \quad (8)$$

The above equation can also help calculate the response of a machine X to the displacement of the foundation, Y.

The isolator's effectiveness (dB) is:

$$E = 10 \log_{10} \frac{1}{T}. \quad (9)$$

The isolator's effectiveness in percent is:

$$(1-T)*100 = \text{Percent Isolation}. \quad (10)$$

Michael F. Winthrop † and Richard G. Cobb proposed various vibration control elements as a practical application for space vehicles vibration isolation. These are again explained as vibration damping elements and vibration stiffness elements. They considered MR and ER fluids and piezoelectric materials as damping elements. Variable stiffness consists of shape memory alloys (SMA), piezoelectric materials, etc. [7].

This type of element is developed for automobile industries. These dampers can change their damping characteristics depending on the electricity applied [5].

Variable stiffness elements are metal alloys that regain their size after strains, when heat is applied to them. They are used to make the semi-active type of isolators.

Vibration control devices have many DOFs and can be used in space vehicle-related or ground testing-related applications [9].

Results and Discussions

Advantages of hybrid isolation:

- 1) Permits the transfer of static loads from the system to be isolated.
- 2) Reduces the power applied externally required as contrast functioning system by keeping lesser bandwidth needed.
- 3) Still allows some vibration isolation if the active element fails.

Disadvantage of hybrid isolation:

- 1) possibility of instability arises in the system due to active isolation;
- 2) chance of damage due to detuning of one of the isolation methods.

To change tuneable parameters, semi-active control implements a tuning scheme of passive elements of damping.

Thus, we obtained the following results:

- 1) reduction of the energy applied from the outside;
- 2) price reduction;
- 3) passive isolation when the active part is faulty;
- 4) potential of becoming as effective as feedback systems;
- 5) higher chance of stability when only the damping element is changed.

However, we know this change can cause further instability of the system. In reality, the setup is in need for a change of work. The variable stiffness element can be shown as a fixed element of stiffness and also as an active element of force. Due to this, semi-active control is very different from its combination as it employs more actuators and thus gets control. Combined control will not act to remove or swap the passive control [1].

Thus, in this paper, we studied and explained constant stiffness and damping elements providing a high-level understanding of active-passive damping isolation systems using different materials and methods. A trend towards using Smart Materials is observed for vibration control systems [2].

Conclusion

The study concludes that shape memory alloys that will give semi-active control are now in development. SMAs provide numerous opportunities for vibration isolation.

The review helped to state that the current vibration isolation of mechanical devices can be reduced to increase the performance of the system. It will also help to reduce the maintenance cost of the system. We identified analytical calculations necessary to evaluate and check practical applications for the single DOF type setup. The calculations can be used to compare the transmissibility of the system and decide on applying various materials (single or sandwich) to achieve low cost and better transmissibility due to better isolator effectiveness.

REFERENCES

- [1] **Winthrop, Michael F., Richard G. Cobb**, Survey of state-of-the-art vibration isolation research and technology for space applications. Smart structures and materials 2003: Damping and isolation. Vol. 5052. International Society for Optics and Photonics, 2003.
- [2] **Chen Yang et al.**, Study of whole-spacecraft vibration isolators based on reliability method. Chinese Journal of Aeronautics 22.2 (2009): 153–159.
- [3] **C. Yilmaz, N. Kikuchi**, Analysis and design of passive band-stop filter-type vibration isolators for low-frequency applications." Journal of Sound and Vibration 291. 3-5 (2006): 1004–1028.
- [4] **Urgueira Antonio P.V., Raquel A.B. Almeida, Nuno M.M. Maia**, On the use of the transmissibility concept for the evaluation of frequency response functions. Mechanical Systems and Signal Processing 25.3 (2011): 940–951.
- [5] **R.A. Ibrahim**, Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. Journal of sound and vibration 314.3-5 (2008): 371–452.
- [6] **S. Gürgen, M. Alper Sofuoğlu**, Smart polymer integrated cork composites for enhanced vibration damping properties, Composite Structures (2020)
- [7] **A. Carrella, et al.** On the design of a high-static–low-dynamic stiffness isolator using linear mechanical springs and magnets. Journal of Sound and Vibration 315.3 (2008): 712–720.
- [8] **Y. Fukahori**, Use of natural rubber (NR) for vibration isolation and earthquake protection of structures. Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber. Woodhead Publishing, 2014. 371–381.

[9] **S. Santhosh et al.**, Experimental investigation and comparative analysis of rubber engine mount vibration and noise characteristics. *Materials Today: Proceedings* 21 (2020): 638–642.

[10] **M. Long**, (2014). *Vibration and Vibration Isolation. Architectural Acoustics*, 417–455.

THE AUTHOR

SUTAR Praveen – *G.H. Raisoni College of Engineering and management.*

E-mail: sutarpraveen007@gmail.com

Статья поступила в редакцию 03.06.2021; одобрена после рецензирования 09.06.2021; принята к публикации 14.08.2021.

The article was submitted 03.06.2021; approved after reviewing 09.06.2021; accepted for publication 14.08.2021.

Научная статья

УДК 669.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27410>

А.И. Демидов  , И.А. Маркелов

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

 demidov1902@gmail.com

ТЕРМОДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКСИДОВ МОНООКСИДОМ УГЛЕРОДА В ПРИСУТСТВИИ УГЛЕРОДА

Аннотация. В статье приведены результаты расчёта стандартной энергии Гиббса для процессов восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в присутствии углерода в интервале температур 400–1600°K. Проведен сравнительный термодинамический анализ реакций: взаимодействия оксидов железа с монооксидом углерода с образованием диоксида углерода; взаимодействия оксидов железа с углеродом с образованием монооксида углерода, диоксида углерода; взаимодействия оксидов железа с углеродом и монооксидом углерода с образованием диоксида углерода. В основу расчёта заложен принцип независимости протекания реакций в системе. Расчет изменения стандартной энергии Гиббса реакций выполнен на 1 моль атомов исходных веществ или на моль системы. Для этого уравнение реакции и величина изменения стандартной энергии Гиббса были поделены на сумму молей атомов исходных веществ реакции. Показано, что при температурах выше 1000–1100°K восстановление железа из оксида железа(III), оксида железа(II,III) и вюстит-а, находящегося в равновесии с железом ($\text{FeO}1+x'$), происходит за счет взаимодействия с монооксидом углерода в присутствии углерода. В интервале температур 400–800°K возможно восстановление железа из оксидов только за счет взаимодействия с монооксидом углерода.

Ключевые слова: термодинамика, оксиды железа, монооксид углерода, углерод, восстановление.

Для цитирования:

Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в присутствии углерода // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 124–131. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27410>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27410>

A.I. Demidov ✉, I.A. Markelov

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

✉ demidov1902@gmail.com

**THERMODYNAMICS OF IRON OXIDES REDUCTION
BY CARBON MONOXIDE IN THE PRESENCE CARBON**

Abstract. The paper presents the results of a calculation of the standard Gibbs free energy of the reactions of iron oxides reduction by carbon monoxide in the presence of carbon in the temperature range of 900–1600°K. A comparative thermodynamic analysis is made for the following reactions: interaction of iron oxides with carbon monoxide with the formation of carbon dioxide; interaction of iron oxides with carbon to form carbon monoxide, carbon dioxide; interaction of iron oxides with carbon and carbon monoxide to form carbon dioxide. The calculations are based on the principle of independence of the reactions in the system. The calculations of the change of the standard Gibbs free energy of reactions are made per mole of atoms of the initial substances (per mole of the system). It is shown that at temperatures higher than 1000–1100°K the reduction of iron from iron oxide(III), iron oxide(II,III) and FeO_{1+x} occurs due to interaction with carbon monoxide in the presence of carbon. In the temperature range of 400–800°K, iron can be reduced from oxides through the interaction with carbon monoxide only.

Keywords: thermodynamics, iron oxides, carbon monoxide, carbon, reduction.

Citation:

A.I. Demidov, I.A. Markelov, Thermodynamics of iron oxides reduction by carbon monoxide in the presence carbon, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 124–131, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27410>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Термодинамический анализ процессов восстановления железа из оксидов в присутствии углерода представляет интерес в связи с тем, что углерод является основным восстановителем в металлургии чугуна и железа [1–5].

Процесс восстановления железа из оксидов в присутствии углерода обычно рассматривают, анализируя зависимости молярной доли монооксида углерода в газовой фазе от температуры для реакций восстановления оксидов железа монооксидом углерода и для реакции Белла – Будуара [5–10]. Комбинируя эти реакции, получают реакции прямого восстановления железа из оксидов углеродом.

Цель исследования

Целью данной работы является проведение термодинамического анализа на основе результатов расчёта изменения стандартной энергии Гиббса реакций восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в присутствии углерода при температурах 400–1600 К.

Научная новизна работы заключается в том, что сравнительный термодинамический анализ выполнен путем расчета изменения стандартной энергии Гиббса реакций на 1 моль атомов исходных веществ, поскольку энергия Гиббса – экстенсивная термодинамическая характеристика

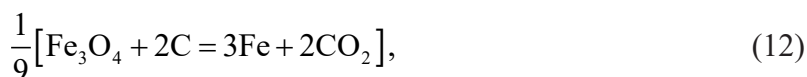
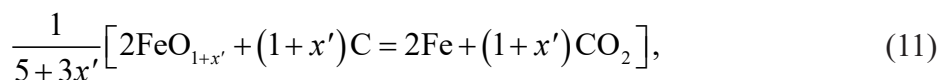
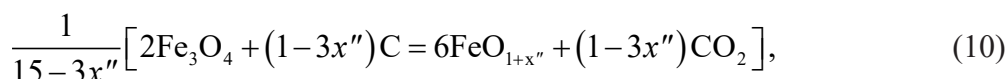
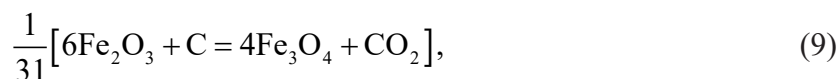
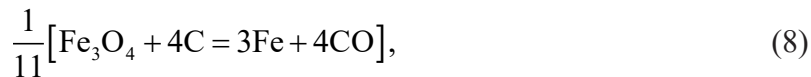
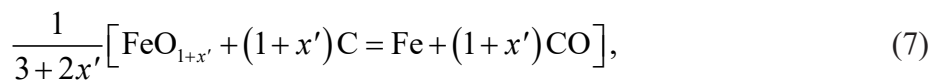
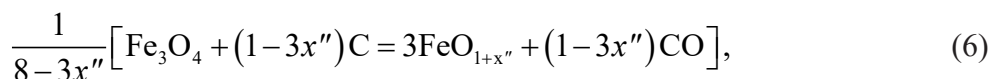
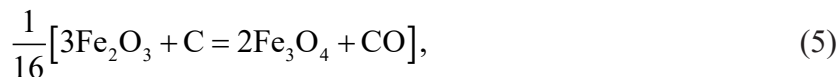
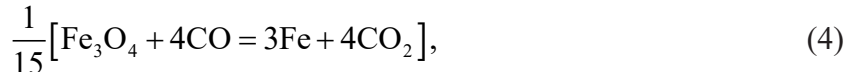
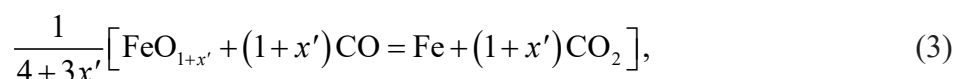
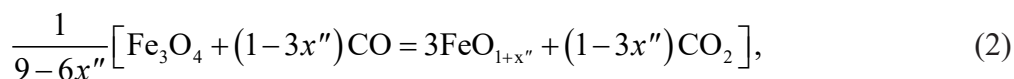
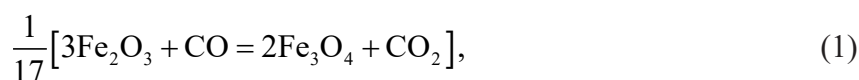
и её значения зависят от количества веществ, участвующих в реакциях, то есть от формы записи уравнений реакций.

Методика расчета

В основу расчёта положен принцип независимости протекания реакций в системе. Расчет изменения стандартной энергии Гиббса реакций выполняли на 1 моль атомов исходных веществ или на моль системы [11, 12]. Для этого уравнение реакции и величину изменения стандартной энергии Гиббса делили на сумму молей атомов исходных веществ реакции. Данные для расчетов взяты из справочников [13, 14]. Из работы [15] взяты значения функции G для вюстита, находящегося в равновесии с магнетитом $\text{FeO}_{(1+x'')}$ или с железом $\text{FeO}_{(1+x')}$.

Проведенные расчеты и анализ результатов

Запишем реакции восстановления оксидов железа монооксидом углерода в присутствии углерода на моль атомов исходных веществ:



$$\frac{1}{48} [9\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} + \text{CO} = 6\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{CO}_2], \quad (13)$$

$$\frac{1}{24 - 9x''} [3\text{Fe}_3\text{O}_4 + (1 - 3x'')\text{C} + (1 - 3x'')\text{CO} = 9\text{FeO}_{1+x''} + (2 - 6x'')\text{CO}_2], \quad (14)$$

$$\frac{1}{9 + 6x'} [3\text{FeO}_{1+x'} + (1 + x')\text{C} + (1 + x')\text{CO} = 3\text{Fe} + (2 + 2x')\text{CO}_2], \quad (15)$$

$$\frac{4}{33} \left[\frac{3}{4} \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} + \text{CO} = \frac{9}{4} \text{Fe} + 2\text{CO}_2 \right]. \quad (16)$$

Для указанных выше реакций результаты расчетов приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

**Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (1), (5), (9) и (13)
в интервале температур 400–1600 К**

Table 1

**Changes in the standard Gibbs energy for reactions (1), (5), (9) and (13)
in the temperature range 400–1600 K**

T, K	$\Delta_r G_T^\circ$ (1)	$\Delta_r G_T^\circ$ (5)	$\Delta_r G_T^\circ$ (9)	$\Delta_r G_T^\circ$ (13)
	кДж/моль			
400	–3,63	2,52	–0,69	–1,73
500	–3,88	1,13	–1,55	–2,37
600	–4,14	–0,26	–2,41	–3,02
700	–4,41	–1,67	–3,28	–3,68
800	–4,72	–3,10	–4,18	–4,37
900	–5,05	–4,56	–5,12	–5,09
1000	5,35	–5,97	–6,02	–5,78
1100	–5,62	–7,36	–6,88	–6,43
1200	–5,89	–8,73	–7,74	–7,08
1300	–6,16	–10,10	–8,59	–7,73
1400	–6,42	–11,46	–9,44	–8,37
1500	–6,69	–12,82	–10,28	–9,01
1600	–6,95	–14,16	–11,12	–9,64

Из табл. 1 видно, что в указанном интервале температур изменения стандартной энергии Гиббса реакций (1), (9) и (13) отрицательны, следовательно, равновесия сдвинуты вправо, в сторону образования продуктов реакций. Изменение стандартной энергии Гиббса для реакции (5) становится отрицательным при температурах выше 600 К. При температурах выше 1100 К эта реакция характеризуется наиболее отрицательными значениями изменения стандартной энергии Гиббса по сравнению с реакциями (1), (9) и (13), следовательно, можно предположить, что при температурах выше 1100 К восстановление железа из оксида железа(III) предпочтительно происходит за счет взаимодействия с монооксидом углерода в присутствии углерода.

Как видно из табл. 2, в указанном интервале температур изменения стандартной энергии Гиббса реакции (2) отрицательны, следовательно, равновесие сдвинуто в сторону образования оксида железа FeO_{1+x} . Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (6), (10) и (14) становятся отрицательными при температурах выше 1000 К. При температуре 1000 К реакция (6) характеризуется наиболее отрицательными значениями изменения энергии Гиббса по сравнению с остальными реакциями, следовательно, возможно, что при температурах выше 1000 К восстановление железа из оксида железа(II,III) происходит за счет взаимодействия с монооксидом углерода в присутствии углерода.

Таблица 2

**Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (2), (6), (10) и (14)
в интервале температур 900–1600 К**

Table 2

**Changes in the standard Gibbs energy for reactions (2), (6), (10) and (14)
in the temperature range 900–1600 K**

T, K	$\Delta_r G_T^\circ$ (2)	$\Delta_r G_T^\circ$ (6)	$\Delta_r G_T^\circ$ (10)	$\Delta_r G_T^\circ$ (14)
	кДж/моль			
900	–0,22	1,03	0,41	0,18
1000	–0,47	–0,94	–0,76	–0,65
1100	–0,76	–2,72	–1,85	–1,46
1200	–0,95	–4,19	–2,72	–2,08
1300	–1,25	–5,64	–3,63	–2,78
1400	–1,48	–6,85	–4,37	–3,34
1500	–1,69	–7,84	–4,99	–3,81
1600	–1,86	–8,50	–5,40	–4,15

Таблица 3

**Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (3), (7), (11) и (15)
в интервале температур 900–1600 К**

Table 3

**Changes in the standard Gibbs energy for reactions (3), (7), (11) and (15)
in the temperature range 900–1600 K**

T, K	$\Delta_r G_T^\circ$ (3)	$\Delta_r G_T^\circ$ (7)	$\Delta_r G_T^\circ$ (11)	$\Delta_r G_T^\circ$ (15)
	кДж/моль			
900	0,28	4,76	3,09	1,84
1000	0,88	–0,40	0,47	0,65
1100	1,43	–5,59	–2,21	–0,58
1200	2,05	–10,67	–4,77	–1,73
1300	2,56	–15,86	–7,48	–3,00
1400	3,06	–21,02	–10,19	–4,28
1500	3,55	–26,18	–12,89	–5,55
1600	4,04	–31,33	–15,61	–6,84

Из табл. 3 видно, что в интервале температур 900–1600 К изменения стандартной энергии Гиббса реакции (3) положительны, следовательно, равновесие сдвинуто влево, в сторону оксида железа $\text{FeO}_{1+x''}$. При стандартных условиях монооксид углерода не восстанавливает оксид железа $\text{FeO}_{1+x''}$ до железа. Реакция (7) характеризуется отрицательными значениями изменения стандартной энергии Гиббса при температурах выше 1000 К, а реакции (11) и (15) при $T > 1100$ К, причем реакции (7) соответствуют наиболее отрицательные значения $\Delta_r G_T^\circ$ по сравнению с реакциями (11) и (15). Следовательно, при температурах выше 1000 К восстановление железа из оксида $\text{FeO}_{1+x''}$ предположительно происходит за счет взаимодействия с монооксидом углерода в присутствии углерода.

Таблица 4

**Изменения стандартной энергии Гиббса для реакций (4), (8), (12) и (16)
в интервале температур 400–800 К**

Table 4

**Changes in the standard Gibbs energy for reactions (4), (8), (12) and (16)
in the temperature range 400–800 K**

T, K	$\Delta_r G_T^\circ$ (4)	$\Delta_r G_T^\circ$ (8)	$\Delta_r G_T^\circ$ (12)	$\Delta_r G_T^\circ$ (16)
	кДж/моль			
400	–0,85	35,92	21,24	11,20
500	–0,75	29,57	17,45	9,18
600	–0,59	23,29	13,74	7,23
700	–0,37	17,09	10,14	5,36
800	–0,10	11,00	6,64	3,58

Как видно из табл. 4, в интервале температур 400–800 К изменения стандартной энергии Гиббса реакций (8), (12) и (16) положительны, следовательно, равновесия реакций сдвинуты влево, в сторону исходных веществ. Только реакция (4) характеризуется отрицательными значениями изменения энергии Гиббса. Поэтому можно предположить, что восстановление железа из оксида железа(II, III) до железа происходит за счет взаимодействия оксида железа(II, III) с монооксидом углерода. Таким образом, в интервале температур 400–800 К возможно восстановление железа из оксидов только за счет взаимодействия с монооксидом углерода (табл. 1, 4).

Полученные результаты и предложенная методика расчета изменения стандартной энергии Гиббса реакций могут использоваться при анализе реакций, протекающих при получении чугуна, стали и железа прямого восстановления.

Выводы

1. В данной работе впервые выполнен расчет изменения стандартной энергии Гиббса реакций на 1 моль атомов исходных веществ или на моль системы для процессов восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в присутствии углерода.

2. Анализ изменений стандартной энергии Гиббса показал, что при температурах выше 1100 К восстановление железа из оксида железа(III) предпочтительно происходит за счет взаимодействия с монооксидом углерода в присутствии углерода.

2. При температурах выше 1000 К восстановление железа из оксида железа(II,III) и $\text{FeO}_{1+x'}$ также происходит за счет взаимодействия с монооксидом углерода в присутствии углерода.

3. В интервале температур 400–800 К возможно восстановление железа из оксидов только за счет взаимодействия с монооксидом углерода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Вегман Е.Ф., Жеребин А.Н., Похвиснев А.Н. и др. *Металлургия чугуна: Учеб. для вузов, 3-е изд., перераб. и доп.* М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.
- [2] Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. *Металлургия железа.* М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 464 с.
- [3] Kuznetsov Yu.S., Kachurina O.I. Reduction of iron oxides by carbon and water vapor, *Steel in Translation*. 5 (49) (2019) 306–318.
- [4] Abdel Halim K.S. Isothermal reduction behavior of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ composite materials with solid carbon, *Materials Science and Engineering A*. (452-453) (2007) 15–22.
- [5] Есин О.А., Гельд П.В. *Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 1. Реакции между газообразными и твердыми фазами.* Свердловск: Metallurgizdat, 1962. 672 с.
- [6] Михайлов Г.Г., Кузнецов Ю.С., Качурина О.И., Чернуха А.С. Анализ фазовых равновесий в системе «оксиды железа – углерод – CO – CO_2 » // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2013. № 1 (13). С. 6–13.
- [7] Костылев Н.А. Восстановление железа из окислов его окисью углерода и твердым углеродом // *Металлург*. 1936. № 1. С. 7–28.
- [8] Lu F., Wen L., Chen Y. Carbon formation on the surface during the reduction of iron oxide particles by CO and CO/ H_2 mixtures, *Chemical Engineering Science*. (205) (2019) 238–247.
- [9] Ünal H.I., Turgut E., Atapek Ş.H., Alkan A. Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material, *High Temp. Mater. Proc.* 8 (34) (2015) 751–756.
- [10] Амдур А.М., Потапов А.М., Резницина А.Л., Лхамсүрен М. Кинетика восстановления железорудного концентрата углем // *Изв. вузов. Черн. Metallургия*, 2012. № 8. С. 17–20.
- [11] Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика взаимодействия оксидов железа с графитом с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры в интервале 900–1600 К // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2013. № 2. С. 138–145.
- [12] Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика восстановления железа из оксидов монооксидом углерода в смеси с диоксидом углерода при постоянном содержании кислорода в системе // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2019. № 1. С. 174–180.
- [13] Barin I., Knacke O. *Thermochemical properties of Inorganic Substances*, With a preface by O. Kubaschewski, Suppl. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1973.
- [14] Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. *Thermochemical properties of Inorganic Substances*, Suppl. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1977.
- [15] Демидов А.И., Маркелов И.А. Термодинамика взаимодействия магнетита и вюстита с монооксидом углерода с учетом изменения состава вюстита при изменении температуры // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. 2013. № 1. С. 166–169.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДЕМИДОВ Александр Иванович — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р хим. наук.
E-mail: demidov1902@gmail.com

МАРКЕЛОВ Илья Александрович — аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: markelov-ia@yandex.ru

REFERENCES

- [1] Ye.F. Vegman, A.N. Zherebin, A.N. Pokhvisnev i dr., Metallurgiya chuguna: Ucheb. dlya vuzov, 3-ye izd., pererab. i dop. M.: IKTs «Akademkniga», 2004. 774 s.
- [2] Yu.S. Yusfin, N.F. Pashkov, Metallurgiya zheleza. M.: IKTs «Akademkniga», 2007. 464 s.
- [3] Yu.S. Kuznetsov, O.I. Kachurina, Reduction of iron oxides by carbon and water vapor, Steel in Translation. 5 (49) (2019) 306–318.
- [4] K.S. Abdel Halim, Isothermal reduction behavior of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ composite materials with solid carbon, Materials Science and Engineering A. (452–453) (2007) 15–22.
- [5] O.A. Yesin, P.V. Geld, Fizicheskaya khimiya pirometallurgicheskikh protsessov. Ch. 1. Reaktsii mezhdugazoobraznymi i tverdyimi fazami. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1962. 672 s.
- [6] G.G. Mikhaylov, Yu.S. Kuznetsov, O.I. Kachurina, A.S. Chernukha, Analiz fazovykh ravnovesiy v sisteme «oksidi zheleza – uglepod – SO – SO_2 » // Vestnik YuUrGU. Seriya «Metallurgiya». 2013. № 1 (13). S. 6–13.
- [7] N.A. Kostylev, Vosstanovleniye zheleza iz oksidov yego oksiyu ugleroda i tverdyim uglerodom // Metallurg. 1936. № 1. S. 7–28.
- [8] F. Lu, L. Wen, Y. Chen, Carbon formation on the surface during the reduction of iron oxide particles by CO and CO/ H_2 mixtures, Chemical Engineering Science. (205) (2019) 238–247.
- [9] H.I. Ünal, E. Turgut, Ş.H. Atapek, A. Alkan, Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material, High Temp. Mater. Proc. 8 (34) (2015) 751–756.
- [10] A.M. Amdur, A.M. Potapov, A.L. Reznitsina, M. Lkhamsuren, Kinetika vosstanovleniya zhelezorudnogo kontsentrata uglem // Izv. vuzov. Chern. Metallurgiya, 2012. № 8. S. 17–20.
- [11] A.I. Demidov, I.A. Markelov, Termodinamika vzaimodeystviya oksidov zheleza s grafitom s ucheto izmeneniya sostava vyustita pri izmenenii temperatury v intervale 900–1600 K // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye. 2013. № 2. S. 138–145.
- [12] A.I. Demidov, I.A. Markelov, Termodinamika vosstanovleniya zheleza iz oksidov monooksidom ugleroda v smesi s dioksidom ugleroda pri postoyannom soderzhanii kisloroda v sisteme // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye. 2019. № 1. S. 174–180.
- [13] I. Barin, O. Knacke, Thermochemical properties of Inorganic Substances, With a preface by O. Kubaschewski, Suppl. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1973.
- [14] I. Barin, O. Knacke, O. Kubaschewski, Thermochemical properties of Inorganic Substances, Suppl. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1977.
- [15] A.I. Demidov, I.A. Markelov, Termodinamika vzaimodeystviya magnetita i vyustita s monooksidom ugleroda s ucheto izmeneniya sostava vyustita pri izmenenii temperatury // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovaniye. 2013. № 1. S. 166–169.

THE AUTHORS

DEMIDOV Aleksandr I. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: demidov1902@gmail.com

MARKELOV Ilya A. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*
E-mail: markelov-ia@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24.08.2021; одобрена после рецензирования 25.08.2021; принята к публикации 16.09.2021.

The article was submitted 24.08.2021; approved after reviewing 25.08.2021; accepted for publication 16.09.2021.

Научная статья

УДК 551.583

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27411>

*В.В. Рогожкин¹, В.И. Горынин¹ ✉, С.Ю. Кондратьев²,
Е.Б. Мишин⁴, Е.В. Коленов⁵, А.В. Шеволдин⁶*

¹ Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов
«Прометей», Санкт-Петербург, Россия;

² АО «Атомпроект», Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

⁴ Московский проектный институт АО «Атомэнергопроект»,
Москва, Россия;

⁵ ПАО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия;

⁶ Санкт-Петербургский филиал Московского проектного института
АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург, Россия

✉ z1dehy97@mail.wplus.net

КУЛЕР ПРОТИВ ПЕРЕГРЕВА АВСТРАЛИИ

Аннотация. Предложено принципиально новое решение проблемы засушливых районов Австралии. Разработана аэротермическая система «Land Coolers» для коррекции аномального потепления регионов Австралии за счет искусственного принудительного формирования над проблемными территориями высотной техногенной облачности. Показана возможность использования для этого атмосферной влаги акватории ближних морей, избыточный тепловой энергосброс тепловых и атомных электростанций и господствующий поток высотно-тропосферных ветров. Зонтичная облачность перистого типа, генерируемая аэротермическим кулером в тропосферу, ослабит солнечную нагрузку и перегрев проблемных территорий Австралии. Для создания такой облачности на высоте более 6 км используется вертикальная паровоздушная струя от модифицированного инжектором прибрежного объекта энергетики, образующего оптически плотную облачность верхнего и среднего яруса тропосферы площадью до 100 тыс. кв. км, защищающая приземный воздух от перегрева и обеспечивающая доступность территорий Австралии тихоокеанским и индоокеанским дождям.

Ключевые слова: аэротермическая система «Land Coolers» (кулер); региональная коррекция аномального потепления (климата); высотная техногенная облачность перистого типа; тропосфера; тепловой энергосброс; теплосбрасывающие электростанции; атмосферная влага акватории морей.

Для цитирования:

Рогожкин В.В., Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Шеволдин А.В. Кулер против перегрева Австралии // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 132–144. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27411>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27411>

V.V. Rogozhkin¹, V.I. Gorynin¹ ✉, S.Yu. Kondratyev³,
E.B. Mishin⁴, E.V. Kolenov⁵, A.V. Shevoldin⁶

¹ Central Research Institute of Structural Materials "Prometey",
St. Petersburg, Russia;

² JSC "Atomproekt", St. Petersburg, Russia;

³ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

⁴ JSC "Atomenergoproekt", Moscow, Russia;

⁵ PJSC "Power machines", St. Petersburg, Russia;

⁶ JSC "Atomenergoproekt", St. Petersburg, Russia

✉ z1dehy97@mail.wplus.net

COOLER AGAINST OVERHEATING OF AUSTRALIA

Abstract. The paper proposes a principle and presents an aerothermal system Land Coolers (cooler) for the correction of abnormal warming (climate) of the regions of Australia. The system generates high-altitude technogenic clouds over problem areas, using atmospheric moisture in the waters of the near seas, excessive thermal energy consumption of thermal and nuclear power plants, and the prevailing flow of high-altitude tropospheric winds. The cirrus-type umbrella cloud generated by the aerothermal cooler into the troposphere weakens the solar load and overheating of the problem areas of Australia. For the formation of high-altitude clouds over 6 km, the system employs a vertical steam-air jet from a coastal energy facility modified by an injector. It forms optically dense clouds of the upper and middle tier of the troposphere with an area of up to 100 thousand square kilometers, protecting the surface air from overheating and ensuring the availability of the territories of Australia to Pacific Ocean and Indian Ocean rains.

Keywords: aerothermal system Land Coolers (cooler); regional correction of abnormal warming (climate); high-altitude technogenic cloud cover of the cirrus type; troposphere; thermal energy saving; heat-saving power plants; atmospheric moisture of the sea area.

Citation:

V.V. Rogozhkin, V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, E.B. Mishin, E.V. Kolenov, A.V. Shevoldin, Cooler against overheating of Australia, Materials Science. Power Engineering, 27 (04) (2021) 132–144, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27411>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Почти половину территории Австралии занимают пустыни и полупустыни практически без водоемов и растительности, чего нет на других континентах Земли. Считается, что климат континента менялся не по естественным причинам, так как несколько десятков тысяч лет назад он был влажным до появления человека. Вырубка леса с запуском механизма обезвоживания и опустынивания привела к тому, что сегодня почти 45% площади Австралии стали пустыней или полупустыней.

Сейчас Австралия переживает рост температуры окружающей среды. В январе 2019 года в городе Аделаида температура воздуха достигала 47,7 °С, в Сиднее 47 °С. Это оказалось проблемой не только для населения, но и для диких животных. Подсчитано, что в конце 2020 г. из-за засухи и пожаров сгорело 63000 км² лесов, ~2500 строений (~1300 жилых домов) и погибло 25 человек. По данным фонда дикой природы (WWF), при этом погибло более 60 тысяч коал и 1 миллиона вомбатов, несколько миллионов кенгуру.



Рис. 1. Формирование в атмосфере (тропосфере) высотной светонепроницаемой облачности при генерации тепловой воздушной струи из градирен атомной электрической станции (АЭС) при отсутствии приземного ветра

Fig. 1. Formation of high-altitude light-tight clouds in the atmosphere (troposphere) when generating a warm air jet from the cooling towers of a nuclear power plant (NPP) in the absence of surface wind



Рис. 2. Вертикальная теплая воздушная струя из градирни АЭС, действующая по схеме аэротермического кулера при отсутствии приземного ветра

Fig. 2. A vertical warm air jet from a nuclear power plant cooling tower, operating according to the scheme of an aerothermal cooler in the absence of surface wind

Генерация электрической энергии обычно сопровождается бесполезной для применения эмиссией тепла в ближайшие водоемы (реки, озера, моря и океаны) и в атмосферу при эксплуатации теплосбрасывающих электростанций (ТСЭС). В связи с этим целесообразно использование теплового (парового, водяного, воздушного) энергетического сброса мощностью 300–500 МВт из высотной башенной градирни для получения высотной светонепроницаемой облачности – средство антиаридной коррекции климата Австралии [1] (рис. 1–2).

Известно, что мощность эмиссии тепла от ТСЭС в окружающую среду в несколько раз больше полезной электрической. Трансформизм тепловой эмиссии прибрежного объекта энергетики в высотную природно-техногенную и оптически плотную облачность делает тепловой энергосброс полезным для, во-первых, коррекции круговорота влаги и климата и, во-вторых, снижения теплового загрязнения окружающей среды.

Принцип коррекции климата в Австралии

Австралия (7,692 млн. км²) окружена сразу двумя океанами с запада и юга (Индийским океаном) и с востока (Тихий океан), а также четырьмя морями вдоль северных и восточных берегов:

Арафурское, Коралловое, Тасманово и Тиморское. При этом Коралловое и Тасманово моря входят в бассейн Тихого океана, а Арафурское и Тиморское — в бассейн Индийского океана. При среднегодовой влажности воздуха Земли $\sim 11 \text{ г/м}^3$ влажность морского воздуха в Австралии в жаркое время может достигать $\eta_w \sim 35 \text{ г/м}^3$.

Природный процесс, характеризующийся температурой воздушной среды тропосферы, очевидно, зависит от уровня солнечной радиации, достигшей поверхности Земли. Облака перистого типа, средне-верхнего яруса тропосферы, могут выступать в качестве регулятора прямой и рассеянной суммарной солнечной радиации. Часть этой радиации поглощается земной поверхностью, её тепло передается приземному воздуху. Другая часть суммарной радиации отражается от поверхности Земли. Регулирование температуры воздуха при аномальном потеплении актуально для Австралии в летнее время (примерно с октября по март).

Коррекция климата Австралии по принципу «COOLER». Принцип коррекции климата «COOLER» (далее С-коррекция) заключается в регулировании температуры земной подстилающей поверхности и приземного воздуха путем генерации «зонтичной» — высотной техногенной облачности (ВТО), используя для этого атмосферную влагу акватории морей и тепловой сброс ТЭС.

Подобием ВТО являются перистые облака средне-верхнего яруса тропосферы, доминирующие на высоте свыше 6 км, и их варианты: перистые плотные (Cirrus spissatus, Cisp), перисто-слоистые (Cirrostratus, Cs) и перисто-кучевые (Circocumulus) [2–3] (рис. 3).

Водность (вода в твердой фазе) или сухость перистого облака η_{ci} составляет $0,01 \text{ г/м}^3 \sim (1/2500) \cdot \eta_w$. Это принципиально важно для системной аэротермической технологии, позволяющей обеспечивать зонтичной ВТО периметр пустыни для ее озеленения и осуществления целей устойчивого развития постпустынной территории.

Прозрачность перистой облачности зависит от её толщины и водности. Показатель ослабления солнечной радиации (в ватт/м^2) в основном в виде электромагнитного излучения Солнца может достигать 40% и более [2]. Долговечность высотного перистого облака обычно от нескольких часов до более суток.

Таким образом, ВТО является эффективным средством ослабления солнечной радиации и снижения уровня обезвоживания земель Австралии в широких пределах при условии плавного-обратимого режима управления регулированием климата. Основным источником воды (влаги) для ВТО служит атмосферная влага акватории Индийского океана, его северных морей и Большого Австралийского залива, переносимая техногенными динамическими струями воздуха на высоту более 6 км.

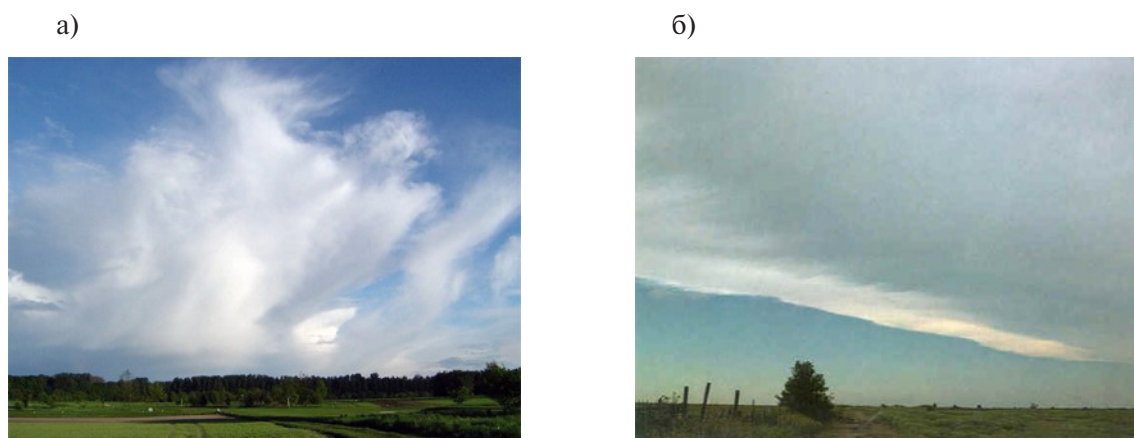


Рис. 3. Различные виды облаков: а — перистые плотные (Cirrus spissatus), б — перистые слоистые (Cirrostratus)

Fig. 3. Various types of clouds: a — cirrus dense (Cirrus spissatus), b — cirrus layered (Cirrostratus)

Система «LandCoolers» для Австралии. С-коррекция климата Австралии возможна при выполнении следующих трех условий:

- 1) природные условия для ВТО,
- 2) природные средства для переноса ВТО в заданном направлении,
- 3) технические средства обеспечения генерации ВТО.

Рассмотрим подробнее эти условия:

1) Фотографии типичной тропосферной струи теплого воздуха из башенной градирни «Gundremmingen» (Германия) с тепловой мощностью более 2000 МВт с детальной видимостью природной маловысотной и техногенной высотной облачностью являются визуальным доказательством наличия условий для организации в Австралии уникального производственного процесса зонтичной ВТО от ТЭС (рис. 1) [1]. Кроме того, на этой фотографии можно видеть плотную тень от образованной зонтичной ВТО, источники и направление переноса ВТО. Форма ВТО, зависящая от высотного ветра, близка к сектору с острым углом.

Относительно высокая температура и повышенная скорость движения факела теплой струи воздуха из градирни ТЭС в атмосфере могут обеспечить для ВТО достижение высоты более 6 км. Важным фактором для генерации зонтичной ВТО является обеспечение малого рассеивания факела струи воздуха приземным ветром.

2) Средством для прогнозируемого переноса зонтичной ВТО является природный высотный (геострофический, «самолетный») ветер верхнего яруса тропосферы. Онлайн-карты ветров и интернет-ресурс [4] определяют их скорости, направления и другие показатели в режиме реального времени (обновление карты ветров каждые 2 часа).

3) Техническое средство для генерации ВТО над пустыней называется «LAND-COOLER» («охладитель земель») или наземный аэротермический кулер [5].

Геоинженерная система «LandCoolers» [5] удовлетворяет следующим требованиям:

- а) поставка на высоту 2 км и выше экологически чистого влагосодержащего продукта природного взаимодействия моря и солнца;
- б) работа длительное время (до 6 месяцев в году) без отказов;
- в) наличие морского/островного или полуостровного прибрежного базирования;
- г) независимость от приземных ветров различного направления;
- д) обладание устойчивостью к цунами и другим водным стрессам;
- е) производство, при потребности, также пресноводного конденсата из морской атмосферной влаги [6–7];
- ж) подконтрольность международному сообществу, например, ООН (UN-Water) и др.

Конструкция аэротермического кулера

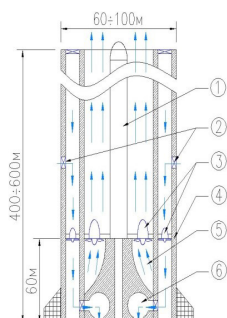
Кулер состоит из инжекторов — полых железобетонных сооружений цилиндрической формы типа башенных градирен высотой 150 м и более, с диаметром сопла 40–100 м. На рис. 4 представлены варианты исполнения основных элементов конструкции инжектора кулера.

Инжектор сооружается заново или реконструируется на базе башен градирни стационарной мощной ТЭС.

Внутри инжектора находятся дополнительные трубные конструкции и электровентиляторные установки для подготовки, контроля и заброса увлажненного воздуха на расчетную высоту 2 км и выше. Высота инжектора кулера и скорость вывода влажного воздуха должны обеспечивать независимость работы комплекса от направления и силы приземных ветров.

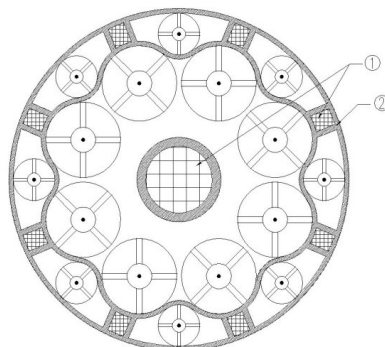
На рис. 5 показаны варианты исполнения и размещения наземного кулера с 6 и 3 инжекторами соответственно. Инжекторы могут быть оснащены системой контроля параметров паровоздушной струи на соответствие экологическим требованиям для градирен Австралии. На рис. 5б третий инжектор справа представлен в виде устройства для производства природной пресной воды.

a)



①	Центральная башня
②	Воздушные клапаны
③	Вентиляторы
④	Железобетон
⑤	Полость воздухозабора
⑥	Полость коллектора

б)



①	Технические помещения
②	Железобетон

Рис. 4. Вид инжектора кулера в осевом (а) и поперечном (б) сечениях

Fig. 4. View of the cooler injector in axial (a) and transverse (b) sections

a)



б)



Рис. 5. Блоки аэротермического кулера с различным количеством инжекторов:

а – с 6 (прибрежное материковое или островное базирование) и б – с 3 (прибрежно-полуостровное базирование)

Fig. 5. Blocks of an aerothermal cooler with a different number of injectors:

а – with 6 (coastal mainland or island-based) and б – with 3 (coastal-peninsular basing)

Мощность аэротермического кулера

Из условия производительности инжектора (по воздуху) $QA = 50000 \text{ м}^3/\text{сек}$ оценим величину мощности (N50) электровентиляторов для подъема воздушной струи на высоту 2 км и более [8]. Пусть диаметр выходного сопла инжектора $D_0 = 40 \text{ м}$, тогда для обеспечения величины Q_A начальная скорость воздушной струи должна быть равна

$$V_{i0} = QA/(\pi \cdot D_0^2/4) = 40 \text{ м/с} = 144 \text{ км/час.} \quad (1)$$

Такая скорость воздуха используется в дозвуковой аэродинамической трубе. Эти параметры вертикальных струй воздуха согласно оценке по формуле Пристли [9] могут обеспечить их подъем на высоту 2 км и более при неустойчивой стратификации атмосферы. Максимальная скорость струи на этой высоте $\sim 5 \text{ м/с}$ (рис. 6).

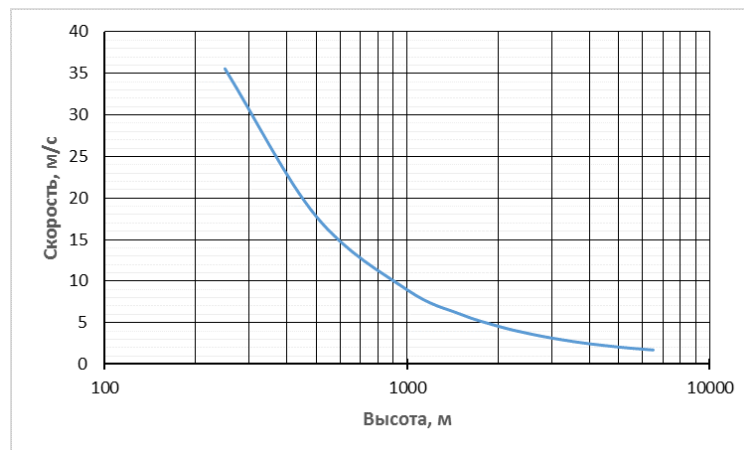


Рис. 6. Зависимость максимальной скорости струи воздуха из сопла инжектора аэротермического кулера от высоты подъема (для вертикальной воздушной струи в нестратифицированной атмосфере)

Fig. 6. The dependence of the maximum velocity of the air jet from the nozzle of the aerothermal cooler injector on the lifting height (for a vertical air jet in an unstratified atmosphere)

Мощность инжектора N_{50} для обеспечения производительности (по воздуху) составляет

$$N_{50} = (\pi/8) \cdot \rho \cdot D \cdot V_{i0}^3 = 45 \text{ МВт}, \quad (2)$$

где $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха.

Определим стабильные видимые размеры ВТО (в форме сектора) [10–11], приняв:

- условное время оптического существования «вещества» зонтика ВТО $\tau_1 = 24 \text{ ч}$;
- изменение водосодержания морского воздуха ($\eta_w \sim 25 \text{ г/м}^3$) при образовании льдистого перистого облака ($\eta_{ci} \sim 0,01 \text{ г/м}^3 = \eta_w/2500$) обусловлено рассредоточением 1:2500 воздушной массы ВТО на высоте свыше 6 км.

Очевидно, что объем ВТО с учетом рассредоточения (1:2500) в перистой облачности составит за сутки:

$$V_{\text{ВТО}} = Q_A \cdot \tau_1 = 50000 \text{ (м}^3/\text{с)} \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} \cdot 2500 = 10800 \text{ км}^3. \quad (3)$$

При характерной толщине перистого облака $h_{ci} = 100 - 400 \text{ м}$ [10–11] площадь ВТО и экранируемой при этом от солнца территории составит:

$$S_{\text{ВТО}} = V_{\text{ВТО}} / h_{ci} = 108000 \div 30000 \text{ км}^2. \quad (4)$$

Глубина распространения зонтичного облака по Австралии для скорости высотного ветра $V_{\text{зонт-облако}} = 5-30 \text{ м/с}$, составит

$$R_{\text{зонт-облако}} = 24 \cdot 3600 \text{ сек} \cdot V_{\text{зонт-облако}} = 430 \div 2580 \text{ км}. \quad (5)$$

В зависимости от заданного периметра облачно-теневого ослабления солнечной нагрузки на территорию и количества инжекторов в качестве источника энергии для электроventilляторов системы «Land Coolers» могут использоваться ТЭС мощностью не менее 100 МВт.

Профиль системы «Land Coolers» для территориальной коррекции климата континента

Площадь проблемных территорий, начиная с округа штата Западная Австралия-Кимберли и части Северной территории, штата Южная Австралия, штата Квинсленд и кончая небольшой частью территории штата Новый Южный Уэльс, составляет примерно 3,5 млн. км². Из онлайн-карты ветров на высоте ~10 км [4] (рис. 7) видно, что ветры направлены с запада от Индийского океана на восток до побережья Тихого океана. Поэтому целесообразно размещение 8-12 инжекторов из 2-3 групп аэротермических кулеров, например, севернее или южнее города Брума на западном побережье Индийского океана. Использование его акватории и вектора геострофического ветра с учетом энергокомплекса заданной мощности позволит начать озеленение Большой песчаной пустыни и Танами. Кроме того, зонтичная ВТО может также проходить над более дальними пустынями, например, Гибсона на юге штата Западная Австралия и Симпсона около центра континента.

Использование западно-восточной дуги высотных ветров для переноса ВТО недостаточно для С-коррекции больших пустынь и поэтому её целесообразно усилить за счёт Пертской группы кулеров в направлении Большой пустыни Виктория и равнины Налларбор. При этом часть ВТО после переноса в зону побережья Большого Австралийского залива может использоваться даже для затенения юго-восточного штата Виктория (рис. 7).

Следует отметить, что наличие северо-западной (Брум) и юго-западной (Перт) групп «Land Coolers» обеспечит ВТО и охлаждение не только прибрежные и континентальные зоны штата Западная Австралия, Северной территории и штата Южная Австралия, но и континентальные обезвоженные районы таких штатов, как Новый Южный Уэльс и Квинсленд.

Организация сооружения и природно-техногенной эксплуатации геоинженерной системы «Land Coolers» (проектирование, реконструкция энергокомплекса, сооружение и пуск) на западе (в зонах городов Брум и Перт) усилиями федерального правительства Австралии и австралийско-международного бизнеса позволит снизить критичность обезвоживания и опустынивания страны. Это обеспечит устойчивое развитие Австралии за счет управления регулированием ВТО и процессами обновления страны.

Особенности геоинженерной системы «Land Coolers»

Принцип управления температурой приземной атмосферы и подстилающей земной поверхности за счет влажности на основе наземной аэротермической технологии примерно аналогичен гипотетически управляемому вулкану с выделением в атмосферу весьма чистых масс воздуха акватории океана, без пепла, без колебаний почвы и инициации водных стрессов (шторм, цунами и др.)

Аэротермическое и облачно-атмосферное влияние наземного кулера на влажность климата регулируемо и контролируемо. Кулер позволяет менять структуру и оптическую плотность (прозрачность) ВТО, а также свои рабочие параметры вплоть до прекращения генерации зонтичной ВТО, продолжая эксплуатацию по промышленной конденсации атмосферной влаги для производства природной пресной воды хозяйственно-питьевого назначения [6–7, 12–17]. Внеземные и сверхдорогие «линзовые» и «экранные» (из космоса, стратосферы на высоте 20 км и др.) способы ослабления солнечной радиации не имеют этих свойств. Часто предлагается также антиприродное химико-токсичное воздействие на атмосферу для защиты от солнца путем распыления аэрозолей на основе серы и других химических агентов [12–14, 17].

При охлаждении приземного воздуха кулером, вследствие С-экранирования территории Австралии возможен прирост выпадения дождевых осадков в жаркое и сухое время года. Известно, что влагосодержание воздуха в Австралии меняется с широтой от северной части штата Западная Австралия до побережья штатов Южная Австралия и Виктория.

Пониженная водность воздуха Западной Австралии обусловлена присутствием в юго-восточной части Индийского океана холодного Западно-Австралийского течения, которое представля-

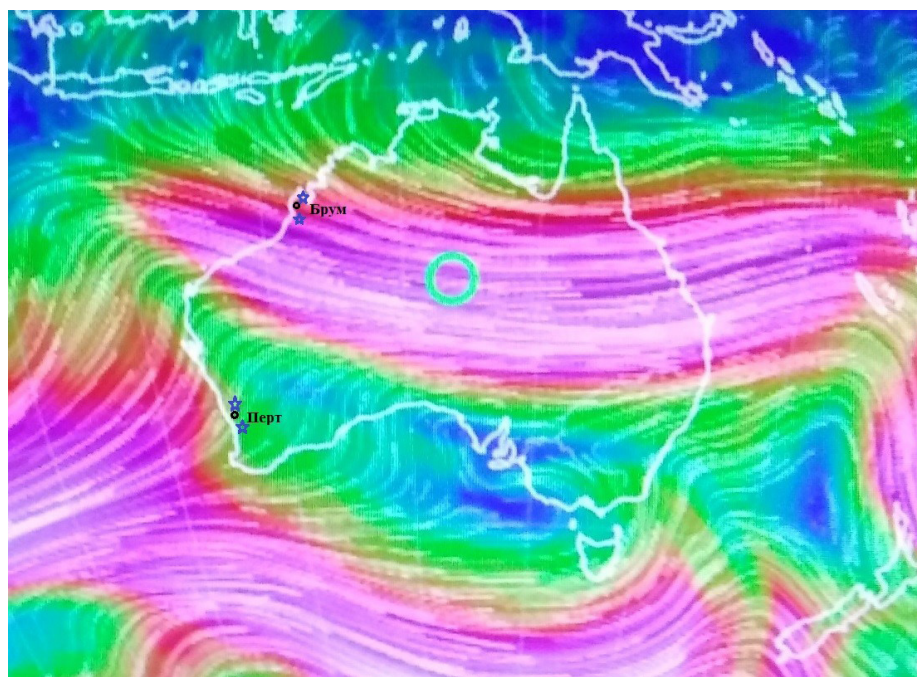


Рис. 7. Схема расположения Западно-Австралийской группы кулеров для коррекции температуры окружающей среды и озеленения пустынь на западе и в центре континента

Fig. 7. The layout of the Western Australian group of coolers for the correction of ambient temperature and landscaping of deserts in the west and in the center of the continent

ет собой Северную ветвь течения. В тропиках Южного полушария часть Западно-Австралийского течения переходит в Южное Пассатное течение, часть диссипирует в Тиморское море.

В связи с этим Индийский океан с учетом циркуляционных условий для переноса с запада на восток водно-воздушных масс может быть фактором увлажнения не только особо засушливой Западно-австралийской части континента, но и центральной части, где граничат штаты Южная Австралия и Квинсленд, а также Северная территория.

Высотная «криогенная» дистилляция ВТО (аналогично природным высотным облакам океанского происхождения) исключает загрязнение защищаемой от солнца территории.

Струйный перенос большого объема теплого воздуха может иметь низкочастотный шумовой фон. Поэтому конструкция инжектора должна компенсировать указанный акустический негативный фактор.

Зона струйного переноса воздуха (радиусом несколько километров вокруг кулера) оснащается заградительными огнями постоянного излучения красного цвета с заданной силой света. По высоте это 3-4 уровня светоограждения с заданным по регламенту Австралии количеством огней с учетом высоты и диаметра башни.

Зона кулера с устройствами светового отражения должна быть закрыта для безопасности полетов авиационных воздушных судов и беспилотных устройств круглые сутки и особенно в темное время суток.

Воздушная струя из сопла инжектора может быть опасна для птиц, летающих вблизи инжекторов. Однако при анализе несомненных преимуществ геоинженерной системы «Land Coolers» по противодействию климатической нестабильности, обезвоживанию и опустыниванию Австралии приоритет имеет одновременное обеспечение сохранности дикой природы и ее животного мира, а также природного комфорта и здоровья человека, что обеспечит реализацию одобренных ООН целей устойчивого развития.

Система «Land Coolers» спасет Австралию от пустынь

В отличие от Сахары и других континентальных пустынь Земли, сравнительно небольшая территория Австралии выделяется тем, что она со всех сторон плотно окружена океанами — источниками дождевой и атмосферной влаги. Однако над горячей поверхностью пустыни в атмосфере формируются задерживающие слои («температурные инверсии»), принципиально препятствующие проникновению дождевой облачности на ее территорию (рис. 8).

Кулер применим именно для снижения «летних» максимальных (включая среднегодовые) температур проблемных земель и приземного воздуха Австралии, для образования обширных стационарных «зимних» внесезонных коридоров для проникновения атмосферной влаги Индийского океана на континент.

Зимой, с апреля по октябрь, облака над морем и побережьем пустынных территорий Австралии не редкость, бывают и дожди. Похожая картина характерна для всех прибрежных пустынь.

«Land Coolers» будет работать [5] также в режиме промышленной конденсации атмосферной влаги моря, при этом специальные вентиляторы подают морской воздух на охлаждение, в специальные охладители-конденсаторы, охлаждающей средой для которых является морская вода. Образующийся пресноводный конденсат (до 0,5 т/с с каждого инжектора), близкий по качеству к дождевой воде, может накапливаться в резервуарах станции и транспортироваться на континент для пополнения природных водоемов, использования в сельском хозяйстве и т.п.

Влияние работы кулера может ощущаться на континенте на значительном расстоянии — порядка нескольких тысяч километров от западного побережья Индийского океана.

Заключение

1. Проблема опустынивания Австралии может быть решена путем управления температурой поверхности пустынь за счет зонтичной высотной-техногенной облачности с использованием природной атмосферной влаги акватории Индийского океана, невостребованного теплового сброса электрической станции и природного господствующего потока ветров среднего и верхнего яруса тропосферы.

2. С-коррекция влажности и температуры окружающей среды до комфортного уровня обеспечиваются стационарными геоинженерными системами «Land Coolers», имеющими объекты энергетики для подготовки и генерации струй теплого увлажненного воздуха на расчетную

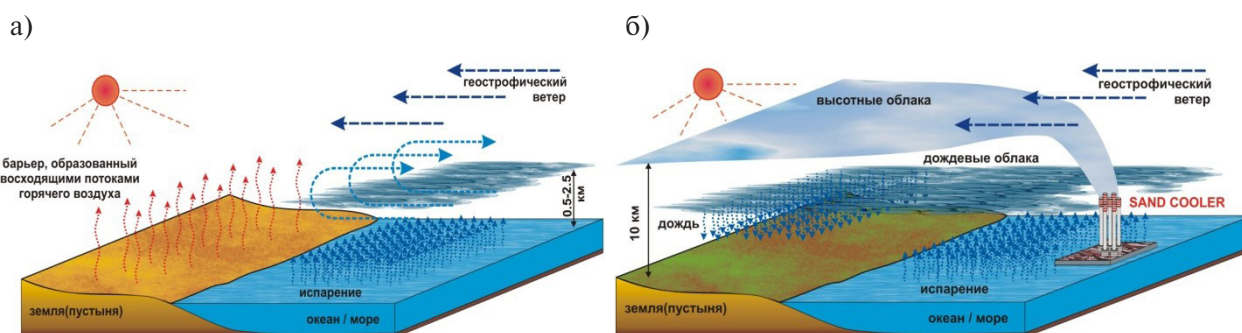


Рис. 8. Блокировка воздушных потоков с моря восходящими (инверсионными) потоками горячего воздуха, идущими от поверхности пустыни (а) и высотные техногенные облака, гонимые геострофическим ветром, снижают тепловой поток от солнца, поверхность «холодной пустыни» теряет способность к генерации мощных восходящих (инверсионных) потоков (б)

Fig. 8. Blocking of air flows from the sea by ascending (inversion) hot air flows coming from the desert surface (a) and high-altitude technogenic clouds driven by geostrophic wind reduce the heat flow from the sun, the surface of the "cold desert" loses the ability to generate powerful ascending (inversion) flows (b)

высоту 2 км за счет большого природного запаса пресной воды в виде пара в атмосфере акватории Индийского океана.

3. Размещение аэротермических кулеров на индоокеанском побережье штата Западная Австралия, занимающего треть площади страны, обеспечит зонтичной высотно-техногенной облачности значительную территорию в несколько сотен тысяч квадратных километров, включая центр с большими пустынями. При этом также могут быть охвачены пустыни Северной территории и штаты Южной Австралии. Для этого целесообразно размещение 8-12 инжекторов из 2-3 групп севернее или южнее городов Брум и Перт на западном побережье Индийского океана.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Пар из градиен самой большой в Германии атомной электростанции «Gundremmingen». [Электронный ресурс]. URL: <https://cs5.pikabu.ru/postimg/big/2014/07/11/6/14050688391700831546.jpg>
- [2] **Григорьев Н.О., Саенко А.Г.** Оценка прозрачности перистых облаков на основе анализа спутниковых фотографий. — Материалы итоговой сессии Ученого совета. — СПб.: Изд. Российского Государственного Гидрометеорологического Университета (РГГМУ), 2005. — 224 с.
- [3] **Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгало Ю.А., Кондратюк В.И., Кулешов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И.** Атлас облаков. — СПб: Д'АРТ, 2011. — 248 с.
- [4] **Камерон Беккариа.** Глобальная карта ветров. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://earth.nullschool.net/about>.
- [5] Патент на изобретение RU 2734834 от 23.10.2020, Бюл. № 30, Кулер для регулирования климата / Рогожкин В.В., Коленов Е.В., Горынин В.И., Шеволдин А.В.
- [6] **Горынин В.И., Рогожкин В.В., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В.** Технология и средства конденсации атмосферной влаги морей для производства пресной воды // Вестник машиностроения. 2019. № 7. С. 84–88.
- [7] **Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Рогожкин В.В., Мишин Е.Б., Коленов Е.В.** Конденсация атмосферной влаги акватории моря для поточного производства природной пресной воды // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26. С. 23–35.
- [8] **Кухлинг Х.** Справочник по физике. М.: Мир, 1982. 519 с.
- [9] **Пристли С.Х.Б.** Турбулентный перенос в приземном слое атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1964. — 122 с.
- [10] **Андреев А.О., Дукальская М.В., Головина Е.Г.** Облака: происхождение, классификация, распознавание. СПб.: Изд. РГГМУ, 2007. — 228 с.
- [11] **Претор-Пинни Г.** Занимательное облаковедение. Учебник любителя облаков. М.: Livebook, 2015. 384 с.
- [12] **Lohman U., Gasparini B.A.** Cirrus cloud climate dial? // Science. 2017. V. 357. Pp. 248–249.
- [13] **Smith W., Wagner G.** Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 2021s of deployment // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 12. Art. 124001.
- [14] **Ricke K., Drouet L., Kalderia K., Tavoni M.** Country-level social cost of carbon // Nature Climate Change. 2018. V. 8. Pp. 895–900.
- [15] **Горынин В.И., Рогожкин В.В., Кондратьев С.Ю., Мишин Е.Б., Коленов Е.В., Шеволдин А.В.** Кулер для регулирования климата – решение проблемы пустыни // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27. № 2. С. 23–37.
- [16] **Горынин В.И., Кондратьев С.Ю., Оленин М.И.** Повышение сопротивляемости разрушению стелей перлитного класса за счет микро- и наноструктурной трансформации карбидной фазы при дополнительном отпуске // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 42–48.

[17] Горынин В.И., Рогожкин В.В., Ланин А.А., Туркбоев А. Особенности проектирования и выбора материалов при изготовлении блоков конденсера для производства природной пресной воды // Научно-технические ведомости СПбГУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 140–148.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РОГОЖКИН Владимир Владимирович — главный специалист, АО "Атомпроект", канд. физ.-мат. наук.

E-mail: vvrogozhkin@atomproekt.com

ГОРЫНИН Владимир Игоревич — начальник лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», д-р техн. наук.

E-mail: z1dehy97@mail.wplus.net

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: petroprom2013@yandex.ru

МИШИН Евгений Борисович — директор Московского проектного института, Московский проектный институт АО «Атомэнергoproject», канд. техн. наук.

E-mail: mishin@aep.ru

КОЛЕНОВ Евгений Викторович — ведущий конструктор, ПАО «Силовые машины», без степени.

E-mail: evkol50@gmail.com

ШЕВОЛДИН Алексей Вячеславович — ведущий инженер, Санкт-Петербургский филиал Московского проектного института АО «Атомэнергoproject», без степени.

E-mail: avshev@gmail.com

REFERENCES

[1] Par iz gradiren samoy bolshoy v Germanii atomnoy elektrostantsii «Gundremmingen». [Elektronnyy resurs]. URL: <https://cs5.pikabu.ru/postimg/big/2014/07/11/6/14050688391700831546.jpg>.

[2] N.O. Grigoryev, A.G. Sayenko, Otsenka prozrachnosti peristyykh oblakov na osnove analiza sputnikovykh fotografiiy. — Materialy itogovoy sessii Uchenogo soveta. — SPb.: Izd. Rossiyskogo Gosudarstvennogo Gidrometeorologicheskogo Universiteta (RGGMU), 2005. — 224 s.

[3] D.P. Besspalov, A.M. Devyatkin, Yu.A. Dovgalyuk, V.I. Kondratyuk, Yu.V. Kuleshov, T.P. Svetlova, S.S. Suvorov, V.I. Timofeyev, Atlas oblakov. — SPb: D'ART, 2011. — 248 s.

[4] Kameron Bekkaria, Globalnaya karta vetrov. 2018. [Elektronnyy resurs]. URL: <https://earth.nullschool.net/about>.

[5] Patent na izobreteniyе RU 2734834 ot 23.10.2020, Byul. № 30, Kuler dlya regulirovaniya klimata / Rogozhkin V.V., Kolenov Ye.V., Gorynin V.I., Shevoldin A.V.

[6] V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, S.Yu. Kondratyev, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov, Tekhnologiya i sredstva kondensatsii atmosfery noy vlagi morey dlya proizvodstva presnoy vody // Vestnik mashinostroyeniya. 2019. № 7. С. 84–88.

[7] V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, V.V. Rogozhkin, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov, Kondensatsiya atmosfery noy vlagi akvatorii morya dlya potochnogo proizvodstva prirodnoy presnoy vody // Materialovedeniye. Energetika. 2020. Т. 26. С. 23–35.

- [8] **Kh. Kukhling**, Spravochnik po fizike. M.: Mir, 1982. 519 s.
- [9] **S.Kh.B. Priestli**, Turbulentnyy perenos v prizemnom sloye atmosfery. — L.: Gidrometeoizdat, 1964. — 122 s.
- [10] Andreyev A.O., Dukalskaya M.V., Golovina Ye.G. Oblaka: proiskhozhdeniye, klassifikatsiya, raspoznavaniye. SPb.: Izd. RGGMU, 2007. — 228 s.
- [11] **G. Pretor-Pinni**, Zanimatelnoye oblakovedeniye. Uchebnik lyubitelya oblakov. M.: Livebook, 2015. 384 s.
- [12] **U. Lohman, B.A. Gasparini**, Cirrus cloud climate dial? // Science. 2017. V. 357. Pp. 248–249.
- [13] **W. Smith, G. Wagner**, Stratospheric aerosol injection tactics and costs in the first 15 years of deployment // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. № 12. Art. 124001.
- [14] **K. Ricke, L. Drouet, K. Kalderia, M. Tavoni**, Country-level social cost of carbon // Nature Climate Change. 2018. V. 8. Pp. 895–900.
- [15] **V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, S.Yu. Kondratyev, Ye.B. Mishin, Ye.V. Kolenov, A.V. Shevoldin**, Kuler dlya regulirovaniya klimata – resheniye problemy pustyni // Materialovedeniye. Energetika. 2021. T. 27. № 2. S. 23–37.
- [16] **V.I. Gorynin, S.Yu. Kondratyev, M.I. Olenin**, Povysheniye soprotivlyayemosti razrusheniyu staley perlitnogo klassa za schet mikro- i nanostrukturnoy transformatsii karbidnoy fazy pri dopolnitelnom otpuske // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii. 2013. № 2. S. 42–48.
- [17] **V.I. Gorynin, V.V. Rogozhkin, A.A. Lanin, A. Turkboyev**, Osobennosti proyektirovaniya i vybora materialov pri izgotovlenii blokov kondensera dlya proizvodstva prirodnoy presnoy vody // Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. T. 24. № 2. C. 140–148.

THE AUTHORS

ROGOZHNIK Vladimir V. — JSC "Atomproekt".

E-mail: vvrogzhkin@atomproekt.com

GORYNIN Vladimir I. — Central Research Institute of Structural Materials "Prometey".

E-mail: z1dehy97@mail.wplus.net

KONDRATYEV Sergey Yu. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

E-mail: petroprom2013@yandex.ru

MISHIN Evgeniy B. — JSC "Atomenergoproekt".

E-mail: mishin@aep.ru

KOLENOV Evgeniy V. — PJSC "Power machines".

E-mail: evkol50@gmail.com

SHEVOLDIN Aleksey V. — JSC "Atomenergoproekt", St-Petersburg Branch.

E-mail: avshev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01.11.2021; одобрена после рецензирования 11.11.2021; принята к публикации 22.11.2021.

The article was submitted 01.11.2021; approved after reviewing 11.11.2021; accepted for publication 22.11.2021.

Научная статья

УДК 620.3

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27412>

А.М. Аль-Машхадани, В.Ф. Першин ✉

Тамбовский государственный технический университет,
г. Тамбов, Россия

✉ pershin.home@mail.ru

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ФОРМОЙ ЧАСТИЦ ИСХОДНОГО ГРАФИТА И ГРАФЕНОВЫХ ПЛАСТИН ПРИ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭКСФОЛИАЦИИ

Аннотация. Материалы на основе графена очень интересны благодаря своим превосходным химическим, физическим и механическим свойствам, которые делают их чрезвычайно полезными в качестве привилегированных материалов в различных промышленных применениях. Жидкофазная эксфолиация графита позволяет получать графен с низким уровнем дефектов. Многие исследователи определяли размеры графеновых пластин полученных жидкофазной эксфолиацией графита, но нет исследований, в которых анализируется связь между формой частиц исходного графита и графеновых пластин. В этой статье анализируются результаты исследований формы и размеров частиц исходного графита и графеновых пластин. Установлено, что форму частиц исходного графита можно представить, как эллипсоид с разными значениями полуосей по трем взаимно перпендикулярным направлениям (длина, ширина, толщина). Найдены примерные соотношения этих размеров, которые можно использовать при расчетах процесса жидкофазной эксфолиации графита.

Ключевые слова: форма частиц; нанопластины; число графеновых слоев, эксфолиация, длина нанопластин.

Для цитирования:

Аль-Машхадани А.М., Першин В.Ф. Взаимосвязь между формой частиц исходного графита и графеновых пластин при жидкофазной эксфолиации // Материаловедение. Энергетика. 2021. Т. 27, № 4. С. 145–158. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27412>

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27412>

A.M. Al-Mashhadani, V.F. Pershin ✉

Tambov State Technical University,
Tambov, Russia

✉ pershin.home@mail.ru

RELATIONSHIP BETWEEN THE SHAPE OF PARTICLES OF INITIAL GRAPHITE AND GRAPHENE PLATES DURING LIQUID-PHASE SHEAR EXFOLIATION

Abstract. Graphene-based materials are very interesting due to their excellent chemical, physical and mechanical properties, which make them extremely useful as preferred materials in various industrial applications. Liquid-phase exfoliation of graphite makes it possible to obtain graphene with a low level of defects. Many researchers have determined the size of graphene plates obtained by liquid-phase exfoliation of graphite, but there are no studies that analyze the relationship between the shape of the particles of the original graphite and graphene plates. This article analyzes the results of studies of the shape and size of parts of the original graphite and graphene plates. It was found that the shape of the initial graphite particles can be represented as an ellipsoid with different values of the semiaxes in three mutually perpendicular directions (length, width, thickness). Approximate ratios of these dimensions have been found, which can be used in calculating the process of liquid-phase exfoliation of graphite.

Keywords: particle shape; nanoplates; number of graphene layers, exfoliation, length of nanoplates.

Citation:

A.M. Al-Mashhadani, V.F. Pershin, Relationship between the shape of particles of initial graphite and graphene plates during liquid-phase shear exfoliation, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (04) (2021) 145–158, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.27412>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. Графен был получен в 2004 г. [1] и из-за своих уникальных свойств стал одним из самых перспективных материалов в разных отраслях промышленности от электроники до строительства. За последнее десятилетие количество публикаций по графену растет в геометрической прогрессии. Самый популярный способ создания сплошных графеновых пленок большой площади это химическое осаждение из паровой фазы (CVD). Этот метод является восходящим, поскольку он использует более простые молекулы для производства непрерывных пленок. Другой путь для крупномасштабного производства графена — это нисходящий подход, при котором частицы порошкообразного графита расслаиваются до графена. На практике используются разные способы эксфолиации графита: механические; химические; электрохимические.

Наиболее часто используются два основных метода [2]:

- окисление графита с образованием оксида графена (GO), с последующим частичным восстановлением и образованием восстановленного оксида графена (rGO) [3, 4];
- жидкофазная эксфолиация (расслоение) графита [5].

В данной работе рассматривается производство графеновых пластин жидкофазной эксфолиацией графита, поскольку частично восстановленный оксид графена имеет много дефектов и фактически не является графеном [2]. Жидкофазную эксфолиацию графита осуществляют обработкой графитовых суспензий ультразвуком или сдвигом. При ультразвуковой обработке на ча-

стицы действуют значительные нагрузки в результате возникновения кавитации, что приводит к дефектам нанопластин и уменьшению их латерального размера. При сдвиговых воздействиях условия более мягкие и требуют существенно меньших затрат энергии, поскольку необходимо преодолеть только силы Вандер Ваальса, которые действуют между графеновыми слоями [6]. За счет использования смесителей с большой скоростью сдвига (более 10^4с^{-1}) был разработан масштабируемый метод расслоения не только графита, но и других слоистых материалов (MoS_2 , BN, WS_2 , MoTe_2) [7]. Как и при обработке ультразвуком, используют поверхностно-активные вещества для облегчения отшелушивания графита и обеспечения стабильной дисперсии графена. Обширная диагностика показала, что чешуйки графена, полученные сдвиговой эксфолиацией, практически не окислены и не имеют дефектов базальной плоскости. Когда скорость сдвига превышала 10^4с^{-1} расслоение графита происходило как в ламинарном, так и в турбулентном режимах. Масштабируя процесс эксфолиации было установлено, что производительность, в пересчете на сухой графен, до 100 г/ч. может быть достигнута при объеме суспензии 10 м³. Дальнейшее развитие данная технология получила после разработки роторного аппарата с подвижными лопастями [8]. Расслоение частицы графита осуществляется в зоне контакта двух твердых поверхностей, подвижной лопасти и внутренней поверхности неподвижного корпуса, т.е. практически без зазора. Следует отметить, что эксфолиация осуществляется при любой скорости вращения ротора, от которой зависит только интенсивность процесса. Кроме этого полностью отсутствует кавитация, что повышает качество получаемых графеновых частиц.

Анализ формы и размера частиц является ключевым элементом, потому что многие свойства зависят от размера графеновых пластин [9], характеризовать размеры частиц, без описания их формы не возможно. Эти параметры важны, поскольку необходимо контролировать синтез, для последующего массового производства нанотехнологической продукции. Контроль размера во время синтеза наноматериалов имеет решающее значение в различных отраслях промышленности, таких как наномедицина, нанопродукты, наноэнергетика или нанокосметика.

Во многих публикациях приводятся результаты анализа формы и размеров графеновых пластин, но нет исследований взаимосвязи формы и размеров этих пластин с формой и размерами исходного графита, именно этот вопрос рассматривается в данной статье.

Анализ формы и размеров частиц исходного графита

Графитовый порошок широко используется в различных отраслях промышленности, в частности, при производстве искусственных алмазов [10]. На рис. 1 показаны снимки четырех фракций графитовых частиц при разных увеличениях [11].

На примере рис. 1а видно, что форма частиц исходного порошка графита достаточно хорошо может быть описана эллипсом. Аналогичные выводы были сделаны после анализа формы частиц графита, представленные в работе [12]. При измельчении частиц графита их форма становится ближе к сферической. В работе [13] приведены результаты исследований механоактивации порошка графита на ударноотражательной мельнице с частотно регулируемым приводом. Линейная скорость ударных элементов ротора мельницы составляла от 30 до 100 м/с. Исследования проводились на порошках природных чешуйчатых графитов — производства КНР (размер частиц 80 МЕШ, зольность не более 0,05%) и завальевского месторождения (размер частиц 80 МЕШ, зольность не более 0,5%). На рис. 2 показаны электронные микрофотографии порошков графита до и после механоактивации. На правом снимке видно, что после механоактивации форма и размеры частиц становятся более однородными.

В работе [14] природный микрокристаллический графит (MCG) с высокой сферичностью и узким гранулометрическим составом был получен методами порошковой инженерии. Частицы MCG были модифицированы с использованием метода влажного перемешивания, а затем частицы были разделены на группы с узкий гранулометрический состав за счет комбинированного

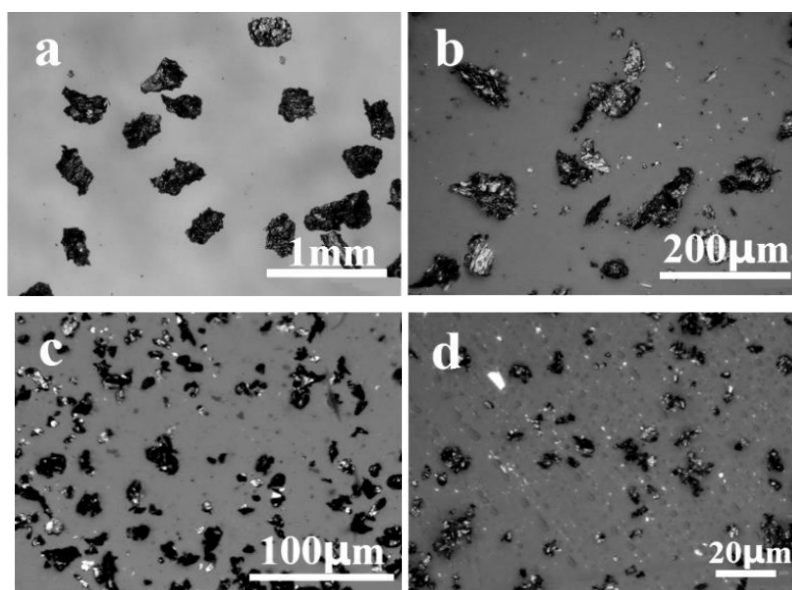


Рис. 1. Снимки графитовых частиц со средними размерами:
а – 180-270 мкм; б – 38-75 мкм; в – 11 мкм; д – 1,3 мкм [11]

Fig. 1. Images of graphite particles with average sizes:
а – 180-270 μm; б – 38-75 μm; в – 11 μm; д – 1.3 μm [11]

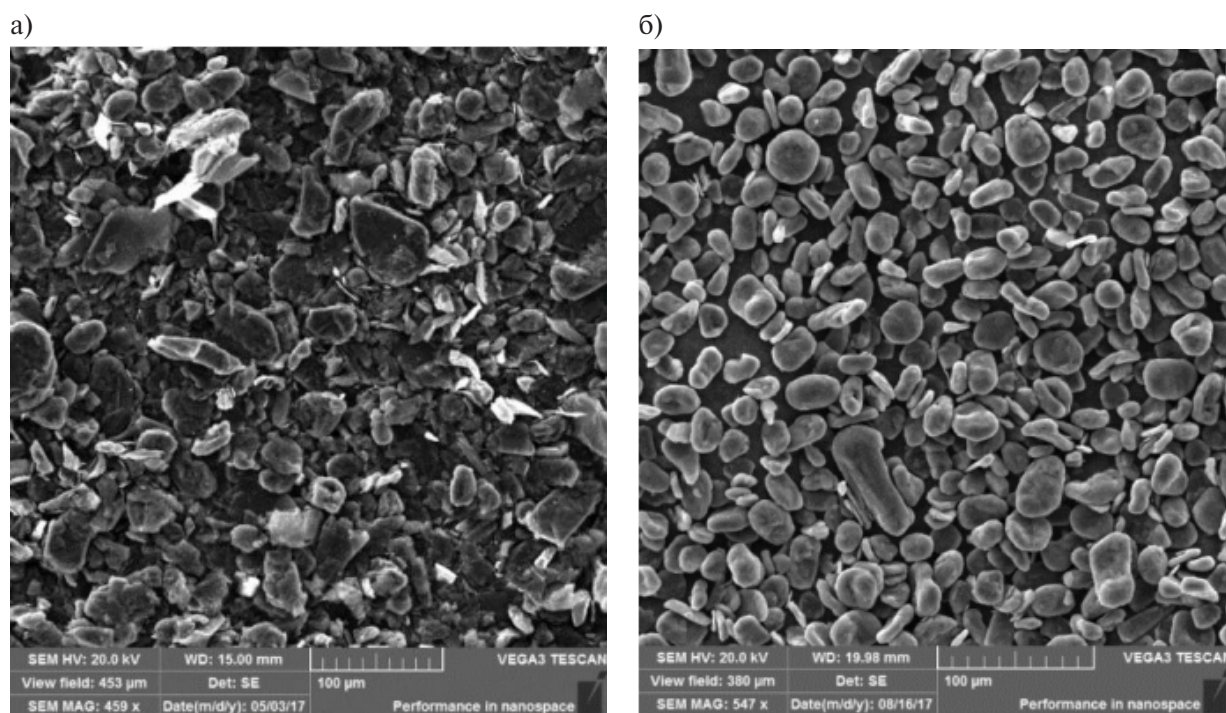


Рис. 2. Электронная микрофотография порошков графита после механической активации:
а) после 1 итерации активации, увеличение 459х; б) после 12 итерации активации, увеличение 547х [13]

Fig. 2. Electron micrograph of graphite powders after mechanical activation:
а) after 1 iteration of activation, magnification 459x; б) after the 12th activation iteration, an increase of 547x [13]

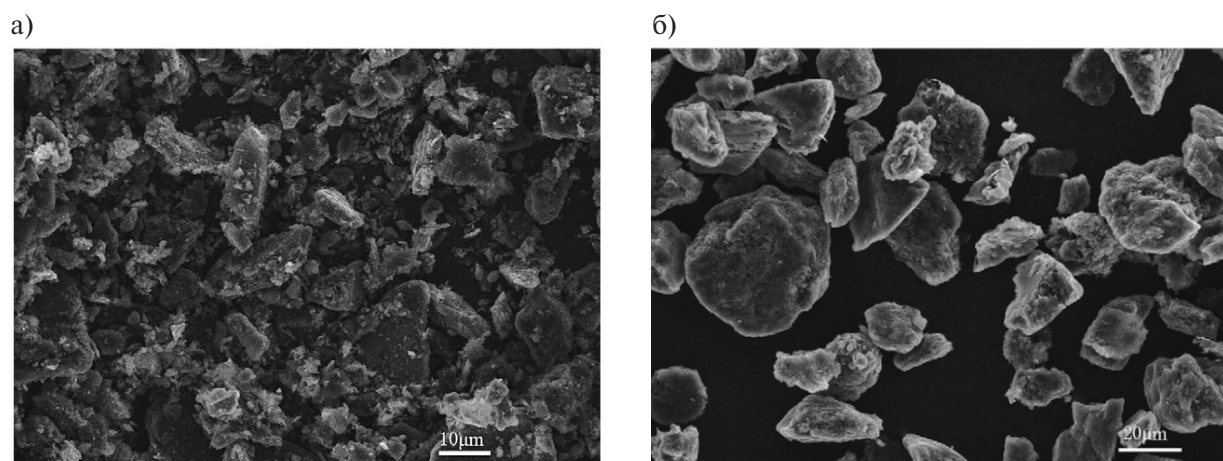


Рис. 3. SEM изображения частиц МСГ до (а) и после (б) классификации [14]

Fig. 3. SEM images of MCG particles before classification (a), and after (b)

гравитационного осаждения и гидроциклона. Результаты классификации показаны на рис. 3. На правом снимке отчетливо видно, что форма всех частиц, может быть описана эллипсом.

В работе [15] исследованы особенности морфологии графитовых частиц железографитовых отходов и установлена зависимость между длиной и толщиной частиц. Авторы работы предложили новый форм-фактор, отношение максимальной длины частицы к ее толщине (K_{Π}):

$$K_{\Pi} = L_{\max} / h. \quad (1)$$

Таблица

Морфологические параметры графитовых частиц

Table

Morphological parameters of graphite particles

Размер фракции, мкм	Длина частиц, мкм			Толщина частиц, мкм			Среднеквадратичное отклонение		Коэффициент вариации		K_{Π}
	$L_{\min}$	$L_{\max}$	L^*	$h_{\min}$	$h_{\max}$	h^*	σ_L	σ_h	K_B^L	K_B^h	
–160+100	104	356	214	4,0	24,0	10,9	59,5	5,06	0,278	0,46	24,8
–100+63	68	204	120	4,0	16,0	6,9	33,0	3,69	0,276	0,53	22,4
–63+50	31	185	82	2,85	14,25	5,2	31,8	2,46	0,39	0,47	18,0
–50	14	80	47	2,85	5,70	3,0	14,0	0,62	0,30	0,2	16,3

Следует отметить, что значения K_{Π} , представленные в таблице не соответствуют значениям по ф-ле (1). Например, для фракции (–160+100) $L_{\max} = 356$, $h = 10,9$, следовательно, в соответствии с ф-лой (1), $K_{\Pi} = 32,7$, а не 24,8, как указано в табл. 1. Мы считаем, что при расчете K_{Π} необходимо использовать среднее значения длины частицы L^* среднее значение толщины h^* , тогда значения данного форм-фактора будут равны: для фракции 1 – 19,6; для фракции 2 – 17,4; для фракции 3 – 15,7; для фракции 4 – 15,8. При практических расчетах, для всех фракций, можно использовать значение $K_{\Pi} = 17$ с максимальным отклонением не более 15%.

Мы проанализировали форму и размеры более 500 частиц, представленных в работах [10–15] и установили, что форма частиц может быть описана, как эллипсоид, с разными полуосями в направлении трех взаимно перпендикулярных осей. При практических расчетах можно принимать отношение длины к ширине равным 2–3, а отношение длины к толщине равным 17–20.

Анализ формы и размеров графеновых нанопластин

Во многих публикациях приводятся сведения о форме, латеральных размерах и числе слоев графеновых нанопластин [5–7, 9, 16]. На рис. 4 показаны SEM-FEG изображения образцов нетронутого графита (рис. 4а), образцы, расслоенные в чистой воде (рис. 4б, в смеси IPA/вода 1: 1 (рис. 4в), и в IPA / воде 7: 3 (рис. 3г) в течение 30 мин обработки [17].

На рис. 5 показано ТЕМ изображение графеновой пластины, полученной обработкой ультразвуком суспензии графита в метил-пироллидоне, последующим центрифугированием при скорости 3000 об/мин [18].

На снимках видно, что форму графеновых пластин можно описать эллипсом. Аналогичные выводы были сделаны после анализа изображений графеновых пластин с разными латеральными размерами [19]. Отношение большой полуоси эллипса к малой оси изменяется в достаточно широком диапазоне. Проведенный нами анализ изображений графеновых пластин [5, 7, 9, 16–18] показал, что данное отношение изменяется в диапазоне от 1,5 до 3,5. Естественно, что есть пластины у которых форма близка к кругу и есть пластины с соотношением осей более 3,5, но это очень малая доля пластин. По нашему мнению, для практических расчетов данное соотношение можно считать равным 2.

При жидкофазной эксфолиации графита, толщина графеновых пластин (число графеновых слоев) изменяется в очень широком диапазоне, от 0,34 нм (однослойные пластины) до десятков микрон. Одной из основных проблем производства графеновых пластин жидкофазной эк-

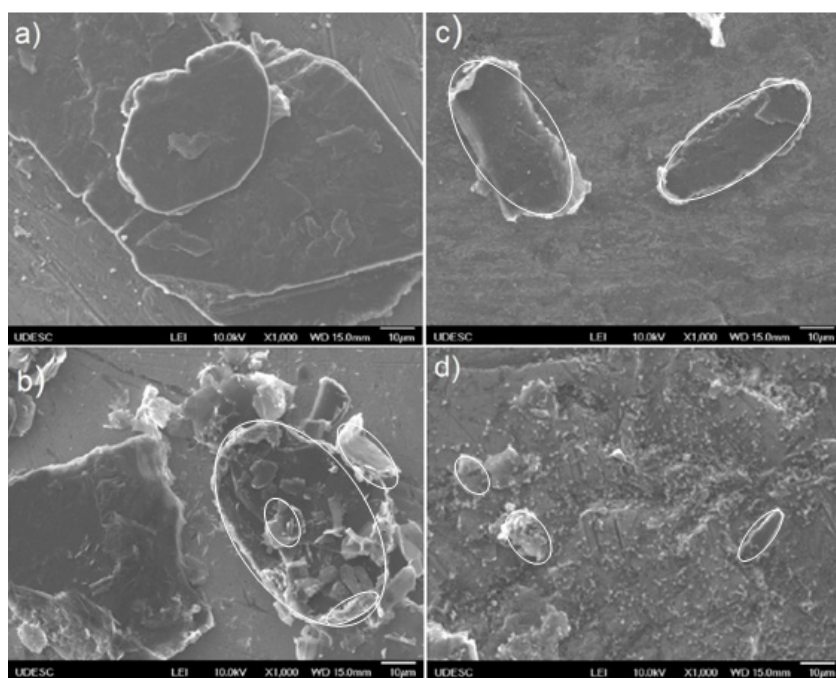


Рис. 4. SEM-FEG изображения образцов: а – нетронутого графита;

б – образцы, расслоенные в чистой воде; с – IPA/вода 1:1; д – IPA / вода 7: 3, обработка в течение 30 мин [17]

Fig. 4. SEM-FEG images of samples: а – pristine graphite; б – samples stratified in pure water; с – IPA / water 1: 1; д – IPA / water 7: 3, processing for 30 min

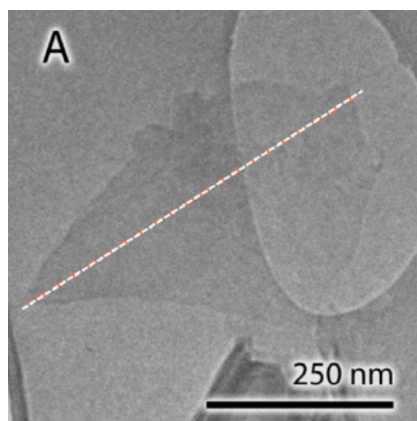


Рис. 5. ТЕМ изображение графеновой частицы, полученной при обработке ультразвуком с последующим центрифугированием при скорости 3000 об/мин [18]

Fig. 5. TEM image of a graphene particle obtained by sonication followed by centrifugation at a speed of 3000 rpm

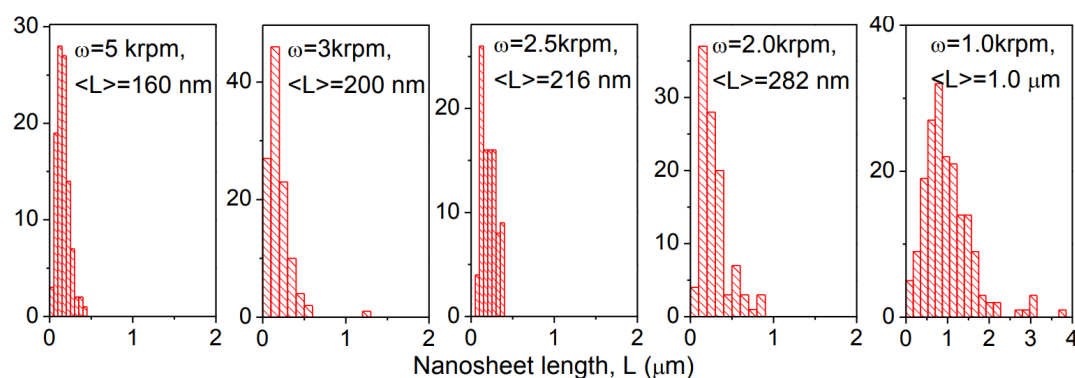


Рис. 6. Распределение графеновых пластин в суспензии, после центрифугирования (скорость центрифугирования и средняя длина пластин показаны на гистограммах) [7]

Fig. 6. Distribution of graphene plates in suspension, after centrifugation (centrifugation speed and average length of plates are shown in histograms)

сфолиацией графита является их классификация (сортировка) по латеральным размерам и числу графеновых слоев. В настоящее время для решения данной проблемы используют процесс седиментации, т.е. оседания частиц дисперсной фазы в жидкости (дисперсионной среде) под действием гравитационного поля или центробежных сил. Поскольку гравитационное осаждение частиц имеющих наноразмеры очень длительный процесс, на практике используют центрифугирование при разных значениях центробежных сил [7].

На рис. 6 показаны гистограммы распределения графеновых пластин по длине, полученные в результате анализа ТЕМ изображений. В данном случае графеновые пластины были получены методом жидкофазной сдвиговой эксфолиации графита, с последующим центрифугированием при скоростях от 1000 до 5000 об/мин в течение 45 минут [7].

Аналогичные данные получены при анализе суспензий, полученных после обработки ультразвуком [18].

На рис. 6 и 7 по горизонтальным осям отложены длины графеновых пластин (нанометры), а по вертикальным осям — число измененных частиц. По гистограммам видно, что с увеличением скорости центрифугирования длина пластин уменьшается. На рис. 8 показана зависимость сред-

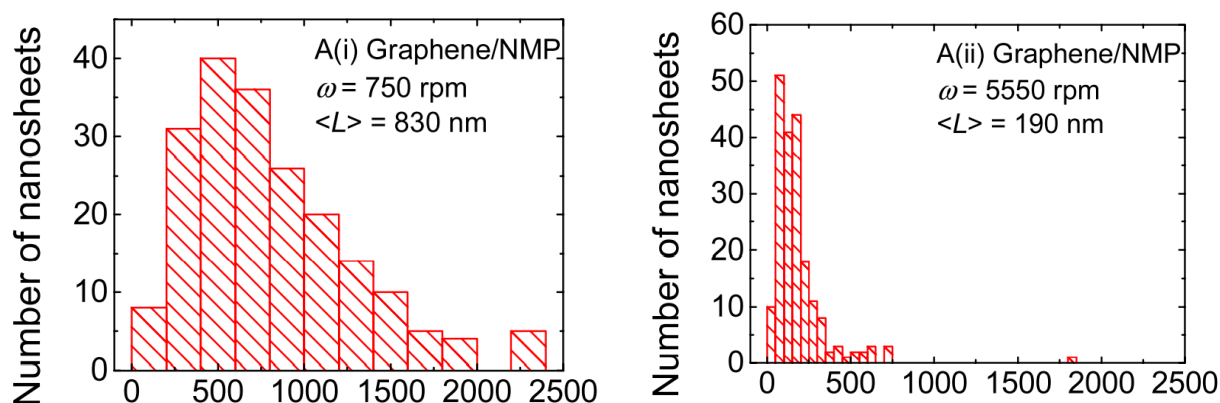


Рис. 7. Распределение графеновых пластин в суспензии, после центрифугирования (скорость центрифугирования и средняя длина пластин показаны на гистограммах) [18]

Fig. 7. Distribution of graphene plates in suspension, after centrifugation (centrifugation speed and average length of plates are shown in histograms)

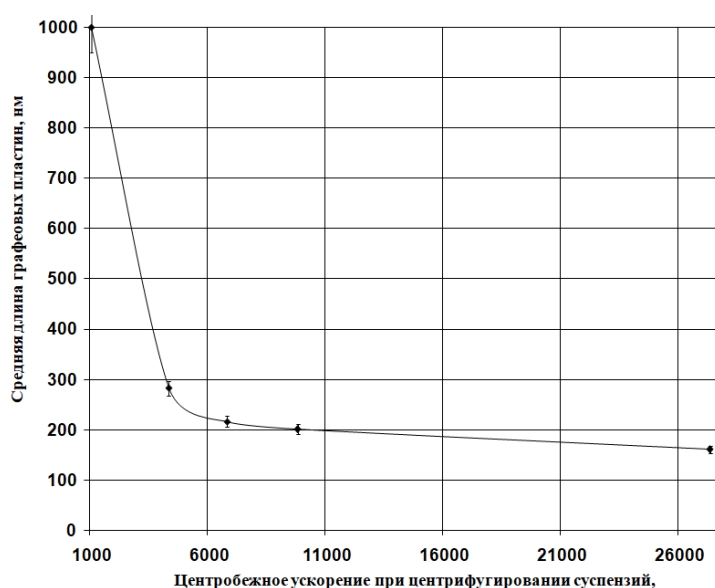


Рис. 8. Зависимость средней длины графеновых пластин от центробежного ускорения при центрифугировании
Fig. 8. Dependence of the average length of graphene plates on centrifugal acceleration during centrifugation

ней длины графеновых пластин от центробежного ускорения (м/с^2) при центрифугировании, построенная по данным работы [7].

Пока мы не нашли объяснения резкого уменьшения средней длины пластин при увеличении центробежного ускорения с 1000 до 4400 м/с^2 . В работе [19] представлены данные влияния скорости центрифугирования на латеральные размеры графеновых пластин и их толщину (число графеновых слоев). Графитовые хлопья обрабатывали ультразвуком в N-метилпирролидоне (NMP) с последующим центрифугированием в течение 45 минут с разными скоростями. Супернатант отделяли от осадка путем удаления верхних 80% дисперсии пипеткой. На рис. 9 результаты определения длины (левая диаграмма) и числа графеновых слоев частиц после центрифугирования с частотой вращения ротора 500 об/мин.

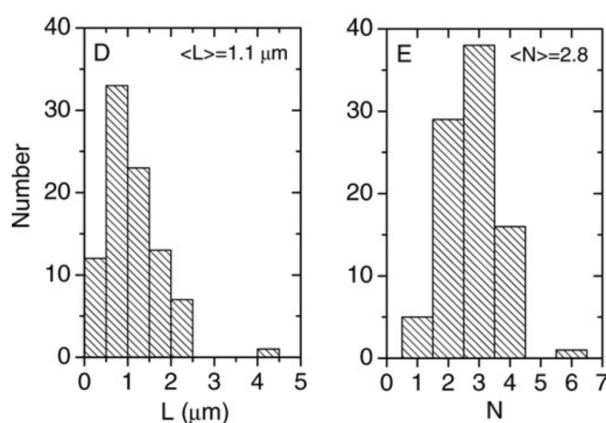


Рис. 9. Гистограммы распределения графеновых пластин по длине (L) и числу графеновых слоев (N) [19]
 Fig. 9. Histograms of the distribution of graphene plates along the length (L) and the number of graphene layers (N)

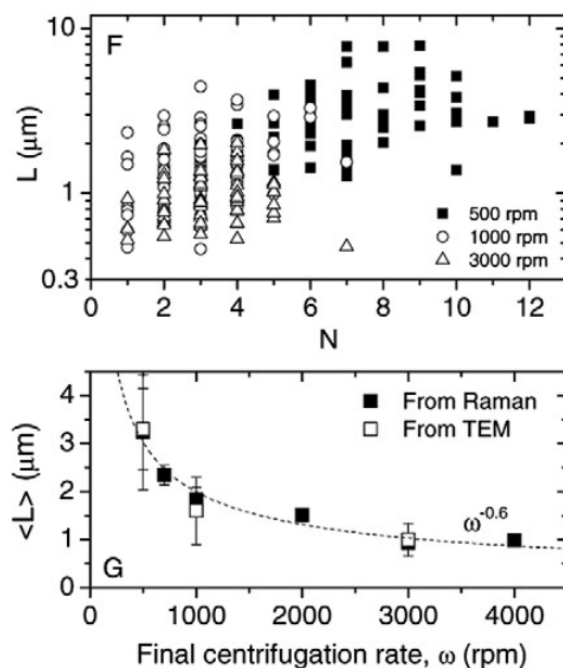


Рис. 10. Индивидуальная длина графеновых пластин и число слоев пластин для дисперсии с частотой центрифугирования 500, 1000 и 3000 об/мин (верхний график), зависимость средней длины от частоты центрифугирования [19]
 Fig. 10. Individual length of graphene plates and the number of layers of plates for dispersion with a centrifugation frequency of 500, 1000, and 3000 rpm (upper graph), the dependence of the average length on the centrifugation frequency

На диаграммах видно, что после центрифугирования с частотой 500 об/мин в течении 45 минут, в супернатанте практически нет графеновых пластин с длиной больше 5 мкм и числом слоев больше 6. Для более детального анализа влияния частоты центрифугирования на размер частиц были получены образцы суспензий с достаточно узкими диапазонами длины частиц. Этот результат был достигнут последовательным центрифугированием при уменьшающихся частотах вращения ротора центрифуги. первый раз исходную суспензию центрифугировали с частотой 4000 об/мин.

В супернатанте остались графеновые пластины с самыми маленькими размерами. Осадок повторно диспергировался в 16 мл NMP обработкой ультразвуком в ванне в течение 15 мин. Затем суспензию центрифугировали при 3000 об/мин, супернатант отбирали, а осадок снова диспергировали в 16 мл NMP. Эту процедуру повторяли еще четыре раза, центрифугируя повторно диспергированный осадок при 2000, 1000, 700 и 500 об/мин, каждый раз собирая супернатант. Каждый из полученных образцов анализировали методом абсорбционной спектроскопии для измерения концентрации графеновых пластин. В дополнение супернатанты фильтровали под вакуумом с образованием тонких пленок, которые были проанализированы рамановской спектроскопией. Для трех супернатантов (3000, 1000 и 500 об/мин) с помощью ТЕМ были измерены длины пластин и определено число графеновых слоев. Результаты измерений представлены на рис. 10. На верхнем рисунке представлены данные при частотах центрифугирования 500, 1000 и 3000 об/мин. Подавляющее число частиц в образце после центрифугирования при 500 об/мин имеют длину от 1 до 7 мкм. После центрифугирования с частотой 1000 об/мин длина частиц изменяется от 0,4 до 3 мкм, с частотой 3000 об/мин — от 0,4 до 2 мкм.

На нижнем графике показана зависимость средней длины частиц от скорости центрифугирования. Средние значения длины $\langle L \rangle$, равны 3,3, 1,6 и 0,94 мкм для образцов при частотах центрифугирования 500, 1000 и 3000 об/мин соответственно. Авторы работы [19] отмечают, что представленные данные являются ориентировочными, поскольку выборку из 50–100 частиц нельзя считать представительной. Следует отметить, что в одном миллилитре суспензии находится от 10^5 частиц [9].

Размер графеновых пластин после центрифугирования зависит не только от центробежного ускорения и времени центрифугирования, но от свойств дисперсионной среды [20–22].

Выводы

Проведенный анализ формы и размеров частиц исходного графита и графеновых пластин полученных жидкофазной эксфолиацией графита позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Форма частиц исходного графита достаточно хорошо описывается эллипсоидом с отношением полуосей по трем взаимно перпендикулярным осям (длина/ширина/толщина) 1/2/20.
2. Форму графеновых пластин можно описывать эллипсом с отношением длины к ширине 1,5–2,5.
3. После центрифугирования суспензии при центробежных ускорениях 270 м/с^2 в течении 45 минут, средняя длина нанопластин порядка 1 мкм, а число графеновых слоев не превышает 10.
4. При увеличении центробежных ускорений при центрифугировании в течении 45 минут с 270 до 2700 м/с^2 длина графеновых пластин уменьшается с 1 мкм до 0,2 мкм, а максимальное число графеновых слоев с 10 до 3.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science 2004. 306. Pp. 66–669. DOI: 10.1126/science.1102896
- [2] Alan P. Kauling, Andressa T. Seefeldt, Diego P. Pisoni, Roshini C. Pradeep, Ricardo Bentini, Ricardo V.B. Oliveira, Novoselov K.S., Antonio H. Castro Neto. The Worldwide Graphene Flake Production // Adv. Mater. 2018. DOI: 10.1002/adma.2018037841803784
- [3] Stankovich S., Dikin D.A., Piner R.D., Kohlhaas K.A., Kleinhammes A., Jia Y., Wu Y., Nguyen S.T., Ruoff R.S. Synthesis of Graphene-Based Nanosheets via Chemical Reduction of Exfoliated Graphite Oxide // Carbon 2007 45 7. Pp. 1558–1565. DOI: 10.1016/j.carbon.2007.02.034

- [4] **Hernandez Y., Nicolosi V., Lotya M., Blighe F.M., Sun Z., De S., McGovern I.T., Holland B., Byrne M., Gun'Ko Y.K., Boland J.J., Niraj P., Duesberg G., Krishnamurthy S., Goodhue R., Hutchison J., Scardaci V., Ferrari A.C., Coleman J.N.** High-Yield Production of Grapheme by Liquid-Phase Exfoliation of Graphite // *Nat. Nano* 2008 3 9. Pp. 563–568. DOI: 10.1038/nnano.2008.215
- [5] **Chen X., Dobson J.F., Raston C.L.** Vortex fluidic exfoliation of graphite and boron nitride // *Chem. Commun.* 2012 48. Pp. 3703–3705. DOI:10.1039/cc17611d
- [6] **Paton K.R., Varrla E., Backes C., Smith R.J., Khan U., O'Neill A., Boland C., Lotya M., Istrate O.M., King P. et al.** Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids // *Nat. Mater.* 2014 13. Pp. 624–630. DOI: 10.1038/nmat3944
- [7] **Першин В.Ф., Аль-Шиблави К.А.Х., Аль-Машхадани А.М.Р., Артемов В. Н., Воробьев А.М., Киселев С.А., Мелехин Д.Д., Меметов Н.Р., Осипов А. А., Пасько А.А., Ткачев А.Г.** Способ получения графеносодержащих суспензий и устройство для его реализации. Пат. 2 720 684 Российская Федерация, МПК C01B 32/186, B82Y 40/00, B02C 19/20.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ" № 2019101764; заявл. 13.03.2019; опубл. 12.05.2020. Бюл. № 14. 14 с.: ил.
- [8] **Juan Amaro-Gahete, Almudena Benítez, Rocío Otero, Dolores Esquivel, César Jiménez-Sanchidrián, Julián Morales, Álvaro Caballero, Francisco J. Romero-Salguero.** A Comparative Study of Particle Size Distribution of Graphene Nanosheets Synthesized by an Ultrasound-Assisted Method // *Nanomaterials* 2019 9. P. 152. DOI: 10.3390/nano9020152
- [9] **Hui Zhang, Dongting Wu, Tao Luan, Guangchun Xiao, Wei Zhao.** Effects of Graphite Particle Size on Microstructure and Properties of In-situ Ti-V Carbides Reinforced Fe-based Laser Cladding Layer // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2019 14. Pp. 2208–2215. DOI: 10.20964/2019.03.60
- [10] **Юдина Т.Ф., Блиничев В.Н., Братков И.В., Гущина Т.В., Мельников А.Г.** Исследование процесса сфероидизации природных графитов // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. 61. С. 48–52.
- [11] **Xing Wang, Guo-Sheng Gai, Yu-Fen Yang, Wan-Ci Shen.** Preparation of natural microcrystalline graphite with high sphericity and narrow size distribution // *Powder Technology* 2008. 181. Pp. 51–56. DOI:10.1016/j.powtec.2007.06.025
- [12] **Маслов В.А., Трофимова Л.А., Дан Л.А.** Особенности морфологии графитовых частиц дисперсных железографитовых отходов // *Вісник приазовського державного технічного університету* 2011. 2 С. 127–131.
- [13] **Li-Shang Lin, Wei Bin-Tay, Zabeada Aslam, A.V.K. Westwood, R. Brydson.** Determination of the lateral size and thickness of solutionprocessed graphene flakes / *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 2017 902. DOI: 10.1088/1742-6596/902/1/012026
- [14] **Elisa Hellen Segundo, Luis Cesar Fontana, Abel A.C. Recco, Juliano Sadi Scholtz, Marco Aurelio Nespolo Vomstein, Daniela Becker.** Graphene nanosheets obtained through graphite powder exfoliation in pulsed underwater electrical discharge // *Materials Chemistry and Physics* 2018 217. Pp. 1–4. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.06.036
- [15] **Mustafa Lotya, Aliaksandra Rakovich, John F. Donegan, Jonathan N. Coleman.** Measuring the lateral size of liquid-exfoliated nanosheets with dynamic light scattering // *Nanotechnology* 2013 24 265703. DOI: 10.1088/0957-4484/24/26/265703
- [16] **Umar Khan, Arlene O'Neill, Harshit Porwal, Peter May, Khalid Nawaz, Jonathan N. Coleman.** Size selection of dispersed, exfoliated graphene flakes by controlled centrifugation // *CARBON* 2012 50. Pp. 470–475. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.09.001
- [17] **Shuai Wang, Min Yi, Zhigang Shen.** The effect of surfactants and their concentration on the liquid exfoliation of graphene // *RSC Adv* 2016 6. Pp. 56705–56710. DOI: 10.1039/C6RA10933K
- [18] **Hou D., Liu Q., Wang X., Qiao Z., Wu Y., Xu B., Ding S.** Urea-assisted liquid-phase exfoliation of natural graphite into few-layer graphene // *Chem. Phys. Lett.* 2018. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cplett.2018.04.019

- [19] Saiful Badri M.A., Salleh M.M., Md Noor N.F., Rahman M.Y.A., Umar A.A. Green synthesis of few-layered graphene from aqueous processed graphite exfoliation for graphene thin film preparation // Mater. Chem. Phys. 2017. Pp. 212–219. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.02.029
- [20] Claudia Backes, Beata M Szydlowska, Andrew Harvey, Shengjun Yuan, Victor VegaMayoral, Ben R. Davies, Pei-liang Zhao, Damien Hanlon, Elton Santos, Mikhail I. Katsnelson, Werner Josef Blau, Christoph Gadermaier, Jonathan N. Coleman. Production of Highly Monolayer Enriched Dispersions of Liquid Exfoliated Nanosheets by Liquid Cascade Centrifugation // ACS Nano, Just Accepted Manuscript 2016. DOI.org/10.1021/acsnano.5b07228

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АЛЬ-МАШХАДАНИ Али Мохаммед — аспирант, Тамбовский государственный технический университет, без степени.

E-mail: ali20082001m@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>

ПЕРШИН Владимир Федорович — профессор, Тамбовский государственный технический университет, д-р техн. наук.

E-mail: pershin.home@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0213-9001>

REFERENCES

- [1] K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov, Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science 2004. 306 Pp. 666–669. DOI: 10.1126/science.1102896
- [2] Alan P. Kauling, Andressa T. Seefeldt, Diego P. Pisoni, Roshini C. Pradeep, Ricardo Bentini, Ricardo V. B. Oliveira, K.S. Novoselov, Antonio H. Castro Neto, The Worldwide Graphene Flake Production // Adv. Mater. 2018. DOI: 10.1002/adma.2018037841803784
- [3] S. Stankovich, D.A. Dikin, R.D. Piner, K.A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Synthesis of Graphene-Based Nanosheets via Chemical Reduction of Exfoliated Graphite Oxide // Carbon 2007 45 7. Pp. 1558–1565. DOI: 10.1016/j.carbon.2007.02.034
- [4] Y. Hernandez, V. Nicolosi, M. Lotya, F.M. Blighe, Z. Sun, S. De, I.T. McGovern, B. Holland, M. Byrne, Y.K. Gun'Ko, J.J. Boland, P. Niraj, G. Duesberg, S. Krishnamurthy, R. Goodhue, J. Hutchison, V. Scardaci, A.C. Ferrari, J.N. Coleman, High-Yield Production of Graphene by Liquid-Phase Exfoliation of Graphite // Nat. Nano 2008 3 9. Pp. 563–568. DOI: 10.1038/nnano.2008.215
- [5] X. Chen, J.F. Dobson, C.L. Raston, Vortex fluidic exfoliation of graphite and boron nitride // Chem. Commun. 2012 48. Pp. 3703–3705. DOI: 10.1039/cc17611d
- [6] K.R. Paton, E. Varrla, C. Backes, R.J. Smith, U. Khan, A. O'Neill, C. Boland, M. Lotya, O.M. Istrate, P. King et al., Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids // Nat. Mater. 2014 13. Pp. 624–630. DOI: 10.1038/nmat3944
- [7] V.F. Pershin, K.A.Kh. Al-Shiblavi, A.M.R. Al-Mashkhadani, V.N. Artemov, A.M. Vorobyev, S.A. Kiselev, D.D. Melekhin, N.R. Memetov, A.A. Osipov, A.A. Pasko, A.G. Tkachev, Sposob polucheniya grafenopodobnykh suspenziy i ustroystvo dlya yego realizatsii. Pat. 2 720 684 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C01B

32/186, B82Y 40/00, B02C 19/20.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "ТГТУ" № 2019101764; заявл. 13.03.2019; опubl. 12.05.2020 Byul. № 14. 14 s.: il.

[8] **Juan Amaro-Gahete, Almudena Benítez, Rocío Otero, Dolores Esquivel, César Jiménez-Sanchidrián, Julián Morales, Álvaro Caballero, Francisco J. Romero-Salguero**, A Comparative Study of Particle Size Distribution of Graphene Nanosheets Synthesized by an Ultrasound-Assisted Method // *Nanomaterials* 2019 9. Pp. 152. DOI: 10.3390/nano9020152

[9] **Hui Zhang, Dongting Wu, Tao Luan, Guangchun Xiao, Wei Zhao**, Effects of Graphite Particle Size on Microstructure, Properties of In-situ Ti-V Carbides Reinforced Fe-based Laser Cladding Layer // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2019 14. Pp. 2208 – 2215. DOI: 10.20964/2019.03.60

[10] **T.F. Yudina, V.N. Blinichev, I.V. Bratkov, T.V. Gushchina, A.G. Melnikov**, Issledovaniye protsessa sferoidizatsii prirodnkh grafitov // *Izv. vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya*. 2018. 61. C. 48–52.

[11] **Xing Wang, Guo-Sheng Gai, Yu-Fen Yang, Wan-Ci Shen**, Preparation of natural microcrystalline graphite with high sphericity and narrow size distribution // *Powder Technology* 2008. 181. Pp. 51–56. DOI: 10.1016/j.powtec.2007.06.025

[12] **V.A. Maslov, L.A. Trofimova, L.A. Dan**, Osobennosti morfologii grafitovykh chastits dispersnykh zhelezografitovykh otkhodov // *Visnik priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu* 2011. 2. C. 127–131.

[13] **Li-Shang Lin, Wei Bin-Tay, Zabeada Aslam, A.V.K. Westwood, R. Brydson**, Determination of the lateral size and thickness of solutionprocessed graphene flakes / *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 2017 902. DOI: 10.1088/1742-6596/902/1/012026

[14] **Elisa Hellen Segundo, Luis Cesar Fontana, Abel A.C. Recco, Juliano Sadi Scholtz, Marco Aurelio Nespolo Vomstein, Daniela Becker**, Graphene nanosheets obtained through graphite powder exfoliation in pulsed underwater electrical discharge // *Materials Chemistry and Physics* 2018 217. Pp. 1–4. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.06.036

[15] **Mustafa Lotya, Aliaksandra Rakovich, John F. Donegan, Jonathan N. Coleman**, Measuring the lateral size of liquid-exfoliated nanosheets with dynamic light scattering // *Nanotechnology* 2013 24 265703. DOI:10.1088/0957-4484/24/26/265703

[16] **Umar Khan, Arlene O'Neill, Harshit Porwal, Peter May, Khalid Nawaz, Jonathan N. Coleman**, Size selection of dispersed, exfoliated graphene flakes by controlled centrifugation // *CARBON* 2012 50. Pp. 470–475. DOI: 10.1016/j.carbon.2011.09.001

[17] **Shuai Wang, Min Yi and Zhigang Shen**, The effect of surfactants and their concentration on the liquid exfoliation of graphene // *RSC Adv* 2016 6. Pp. 56705–56710. DOI: 10.1039/C6RA10933K

[18] **D. Hou, Q. Liu, X. Wang, Z. Qiao, Y. Wu, B. Xu, S. Ding**, Urea-assisted liquid-phase exfoliation of natural graphite into few-layer graphene // *Chem. Phys. Lett.* 2018. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cplett.2018.04.019

[19] **M.A. Saiful Badri, M.M. Salleh, N.F. Md Noor, M.Y.A. Rahman, A.A. Umar**, Green synthesis of few-layered graphene from aqueous processed graphite exfoliation for graphene thin film preparation // *Mater. Chem. Phys.* 2017. Pp. 212–219. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2017.02.029

[20] **Claudia Backes, Beata M Szydłowska, Andrew Harvey, Shengjun Yuan, Victor VegaMayoral, Ben R. Davies, Pei-liang Zhao, Damien Hanlon, Elton Santos, Mikhail I. Katsnelson, Werner Josef Blau, Christoph Gadermaier, Jonathan N. Coleman**, Production of Highly Monolayer Enriched Dispersions of Liquid Exfoliated Nanosheets by Liquid Cascade Centrifugation // *ACS Nano*, Just Accepted Manuscript 2016. DOI.org/10.1021/acsnano.5b07228

THE AUTHORS

AL-MASHHADANI Ali M. – *Tambov State Technical University.*

E-mail: ali20082001m@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7918-8207>

PERSHIN Vladimir F. — *Tambov State Technical University.*

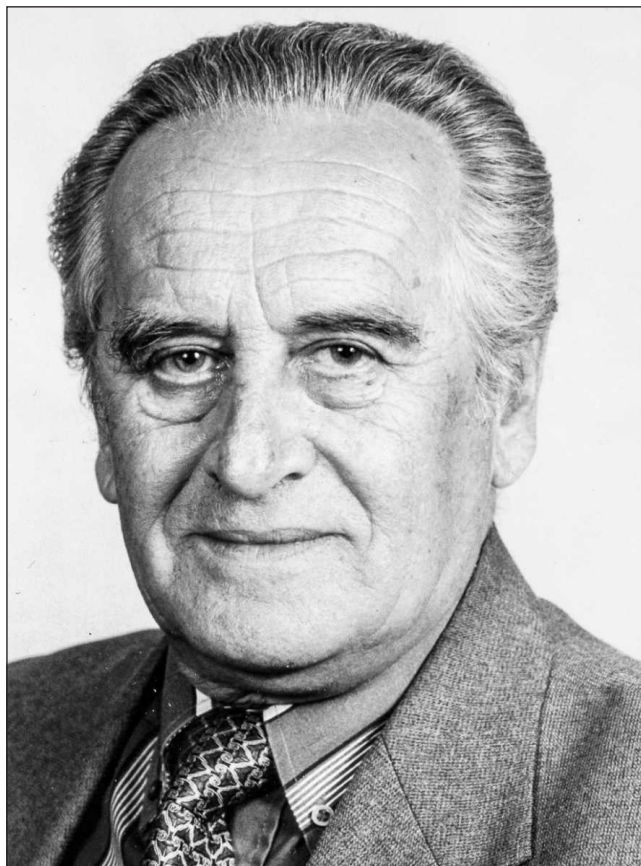
E-mail: pershin.home@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0213-9001>

Статья поступила в редакцию 30.08.2021; одобрена после рецензирования 15.11.2021; принята к публикации 06.12.2021.

The article was submitted 30.08.2021; approved after reviewing 15.11.2021; accepted for publication 06.12.2021.

КИРИЛЛОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ



5 октября 2021 года, на 89-ом году жизни скончался заслуженный профессор СПбПУ Александр Иванович Кириллов.

А.И. Кириллов родился 5 июня 1933 г. в Ленинграде. В 1952 г. окончил музыкальное училище при Ленинградской консерватории им. Н.А. Римского-Корсакова, в 1958 г. — Музыкально-педагогический институт им. Гнесиных в Москве. С отличием окончил Брянский институт транспортного машиностроения по специальности «Турбиностроение» в 1959 г. С 1959 г. по 1961 г. работал в московском объединении «Союз» старшим техником, инженером-экспериментатором, а с 1961 г. по 1962 г. в Лаборатории двигателей АН СССР — младшим научным сотрудником.

После обучения в аспирантуре ЛПИ им. М.И. Калинина на кафедре «Турбиностроение» (1962—1964 гг.) А.И. Кириллов защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук (1964 г.) и продолжил работать на кафедре «Теоретические основы теплотехники» энергомашиностроительного факультета. Занимал должности старшего инженера, ассистента (1964—1966 гг.), доцента (1966—1979 гг.), и.о. заведующего кафедрой (1979—1982 гг.). После защиты докторской диссертации в 1981 г. — профессор, заведующий кафедрой (1982—2004 гг.), по совместительству главный научный сотрудник НИЧ (с 1989 г.).

А.И. Кириллов создатель научной школы, специалист в области аэродинамики паровых и газовых турбин. Основные работы посвящены исследованиями пространственной структуры течения и теплообмена в проточных частях турбомашин. Использовал и активно развивал аналитические

методы, модельный и численный эксперименты. Работал в области численного моделирования трехмерных турбулентных течений и теплообмена в элементах энергетического оборудования. Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований в области аэродинамики паровых и газовых турбин внедрены на турбостроительных заводах. Труды возглавляемой им научной группы получили признание в России и за рубежом. А. И. Кириллов сотрудничал с родственными кафедрами отечественных и зарубежных вузов и научными группами. Читал лекции в высших учебных заведениях и на предприятиях турбостроительного профиля, в т.ч. на ЛМЗ, УТМЗ, Южно-турбинном заводе, ХТЗ, в БГТУ, ДВПИ, АЛТА, на заводе Бергманн-Борзиг в Берлине, в Будапештском техническом университете, в Политехническом институте Сантьяго-де-Куба, в Высшей технической школе г. Радом в Польше, в Брюссельском свободном университете. Выступал с докладами на многих российских и зарубежных конференциях (Москва, Санкт-Петербург, Иркутск, Минск, Харьков, Куйбышев, Владивосток, Гданьск, Дрезден, Брайтон, Кенджу, Сидней, Гренобль, Вашингтон и др.). Разработал и читал курсы лекций «Техническая термодинамика», «Теория тепломассообмена» и «Гидрогазодинамика». Читал курс лекций «Механика жидкости и газа» студентам энергомашиностроительного направления.

Александр Иванович Кириллов награжден медалью «Ветеран труда» (1985 г.), знаком Минвуза СССР «За отличные успехи в работе» (1988). В 2000 г. А.И. Кириллову присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РФ». А.И. Кириллов являлся заслуженным профессором СПбГТУ (1993 г.), почетным профессором Брянского технического университета (2001 г.). Являлся членом Международной энергетической академии. Членом Национального комитета РАН по тепломассообмену. Участвовал в работе диссертационных советов при СПбПУ Петра Великого. Членом редколлегии журналов «Известия вузов. Энергетика» и «Материаловедение. Энергетика».

А.И. Кириллов является автором свыше 150 научных трудов, в том числе 3 монографий, учебных пособий для вузов, 7 изобретений. Подготовил не менее 25 кандидатов и 5 докторов технических наук.

Научное издание

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА

Том 27, № 4, 2021

Учредитель — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации СМИ ЭЛ № ФС 77-78004 от 27.03.2020 г.)

Ответственный секретарь — *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *А.А. Кононовой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

Подписано в печать 28.12.2021.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЭНЕРГЕТИКА"

(ранее «Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки»)

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Материаловедение. Энергетика» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием: зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (Свидетельство о регистрации СМИ от 27.03.2020 г. ЭЛ № ФС 77-78004);

имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2687-1300);

внесен Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора наук и кандидата наук;

с 2005 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНТИ РАН, в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка», в международную библиографическую и реферативную базу данных ProQuest, международную наукометрическую базу Index Copernicus, Google Scholar, международную систему по периодическим изданиям «Ulrich's Periodicals Directory», представлены на платформе Web of Science в виде отдельной базы данных Russian Science Citation Index (RSCI), EBSCO, CNKI, ROAD.

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Представление материалов

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил.

Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим не следует использовать аббревиатуру в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи, быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна быть законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи; они приводятся на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов — не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редакция может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: <http://journals.spbstu.ru>

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

2.2. Оформление материалов

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц — 3.

2.2.2. Число авторов — не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотации — не менее 100 слов на русском и английском языках;

ключевые слова — не менее 3 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) — 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.