

Том 30, №1, 2024



ISSN 2782-6724

Глобальная энергия

Санкт-Петербург

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

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Александров М.Л., член-корр. РАН, Отделение нанотехнологий и информационных технологий РАН, Москва, Российская Федерация;
Зеуровский М.З., ин. Член РАН, академик НАН Украины, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина;
Клименко А.В., академик РАН, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», НИТУ «МИСиС», Москва, Российская Федерация;
Костюк В.В., академик РАН, Российская академия наук, Москва, Российская Федерация;
Лагарьков А.Н., академик РАН, Институт теоретической и прикладной электродинамики ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация;
Окрепилов В.В., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Рудской А.И., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Саркисов А.А., академик РАН, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Российская Федерация;
Федоров М.П., академик РАН, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Сергеев В.В., главный редактор, д-р техн. наук, профессор, чл-корр РАН, первый проректор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Кондратьев С.Ю., зам. главного редактора, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Аксёнов Л.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Баикарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Боровков А.И., к.т.н., проректор по цифровой трансформации, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Гордеев С.К., д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Центральный научно-исследовательский институт материалов, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Забонин В.Н., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Калыев И.А., д-р техн. наук, академик РАН, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация;
Колсун Михал, профессор, Технический университет, Кошице, Словакия;
Коровкин Н.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Куколев М.И., д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Митяков А.В., д-р техн. наук, профессор, Университет Турку, Турку, Финляндия;
Михайлов В.Г., д-р техн. наук, профессор, Бранденбургский технический университет, Бранденбург, Германия;
Райчик Ярослав, д-р техн. наук, профессор, Ченстоховский политехнический университет, Ченстохова, Польша;
Рамасуббу С., PhD, Директор по исследованиям BISS Division, ITW-India (P) Ltd, Бангалор, Индия;
Тендлер М.Б., PhD, ин. член РАН, KTH Royal Institute of Technology, Стокгольм, Швеция;
Титков В.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Толочко О.В., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Фокин Г.А., д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», Санкт-Петербург, Российская Федерация;
Цемченко В.Н., д-р техн. наук, зав. каф., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

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

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

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

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

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

Редакция журнала

О.А. Матенев – ответственный секретарь;

А.А. Кононова – компьютерная вёрстка; Д.Ю. Алексеева – перевод на английский язык.

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

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

Дата выхода: 29.03.2024

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024

30 (1) 2024



ISSN 2782-6724

Global Energy

St. Petersburg

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

GLOBAL ENERGY

EDITORIAL COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial office

O.A. Matenev – editorial manager;

A.A. Kononova – computer layout; D.Yu. Alekseeva – English translation

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

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

Release date: 29.03.2024

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2024

Содержание

Энергетика. Электротехника

Сунь Ц., Сюй Н., Пу С., Ван Ч.Л. Устойчивая бумажная электроника и нейроморфные бумажные чипы.....	7
Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г. Современные подходы к разработке системы охлаждения турбогенераторов с воздушным охлаждением.....	38
Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю., Федянин А.Л. Математическая модель аккумуляторной батареи для проектирования гибридных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии.....	55
Прохоров И.А., Иванов И.Е., Моисеев И.Ф., Дружинин В.Е. Неопределенности обработки опытов по взвешиванию участка стержней автоматического регулятора при измерении парового коэффициента реактивности на реакторе РБМК.....	69
Бусаров С.С., Бакулин К.А. Повышение производительности бесшмазочных малорасходных тихоходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления.....	82
Федюхин А.В., Гашо Е.Г. Методические подходы к анализу энергоэкологического метаболизма городов.....	91
Дителева А.О., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю. Тонкопленочная технология создания перспективных электродных материалов гибридных конденсаторов.....	108
Сысоев А.А., Иудин Д.И., Раков В.А., Емельянов А.А., Климашов В.Ю., Коровкин Н.В. Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов с учетом термодинамики плазменных каналов. Ч. 2. Анализ результатов моделирования.....	117

Металлургия. Материаловедение

Ерутин Д.П., Попович А.А., Суфияров В.Ш. Селективное лазерное плавление аморфно-нанокристаллического сплава на основе кобальта.....	136
Дасаев М.Р., Соколов И.С., Рыженков О.В., Григорьев С.В., Лихаева А.Ю., Атауллин М.Р. Применение PVD-покрытий различной толщины на основе Cr для замедления процесса водородного охрупчивания стали.....	146

Contents

Energetics. Electrical engineering

Sun Q., Xu N., Pu X., Wang Z. L. Paper-based electronics and neuromorphic paper chips.....	24
Kartashova T.N., Prokofev A.Yu., Filin A.G. Modern approaches to cooling system design for air-cooled turbogenerators.....	38
Obukhov S.G., Davydov D.Yu., Fedyanin A.L. Mathematical model of a battery for the design of hybrid power systems based on renewable energy sources.....	55
Prokhorov I.A., Ivanov I.E., Moiseev I.F., Druzhinin V.E. Uncertainties in processing the experiment to determine the efficiency of the section of the automatic regulator rods when measuring the void coefficient of reactivity at the RBMK reactor.....	69
Busarov S.S., Bakulin K.A. Increasing the performance of lubrication-free, low-flow, low-speed, medium- and high-pressure reciprocating compressors.....	82
Fedyukhin A.V., Gasho E.G. Methodological approaches to the analysis of energy-ecological metabolism of cities.....	91
Diteleva A.O., Sleptsov V.V., Kukushkin D.Yu. Thin-film technology for the creation of promising electrode materials for hybrid capacitors.....	108
Sysoev A.A., Iudin D.I., Rakov V.A., Emelyanov A.A., Klimashov V.Yu., Korovkin N.V. Numerical simulation of high-current atmospheric discharges with consideration of plasma channels thermodynamics. Part 2. Analysis of simulation results.....	117

Metallurgy. Material Science

Erutin D.P., Popovich A.A., Sufiarov V.Sh. Selective laser melting of cobalt-based amorphous alloy.....	136
Dasaev M.R., Sokolov I.S., Ryzhenkov O.V., Grigoryev S.V., Likhaeva A.Y., Atullin M.R. Application of Cr-based PVD coatings of different thicknesses for retarding the process of hydrogen embrittlement of steel.....	146

Материал был ранее опубликован. Ссылка для цитирования: Ц. Сунь, Н. Сюй, С. Пу, Ч. Л. Ван Устойчивая бумажная электроника и нейроморфные бумажные чипы. //10 прорывных идей в энергетике на следующие 10 лет: 4-й ежегодный доклад Ассоциации по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия», 2023. С. 3–10. Оригинальный полный текст доклада доступен по ссылке: <https://globalenergyprize.org/ru/2023/06/15/doklad-10-proryvnyh-idej-v-jenergetike-na-sledujushhie-10-let/>

Ц. Сунь, Н. Сюй, С. Пу, Ч. Л. Ван

Пекинский институт наноэнергетики и наносистем,
Китайская академия наук, Пекин, Китай

УСТОЙЧИВАЯ БУМАЖНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И НЕЙРОМОРФНЫЕ БУМАЖНЫЕ ЧИПЫ

Введение. Современная электроника вступила в эпоху многофакторного развития, в которой повышение степени интеграции устройств (или снижение стоимости) не является единственным, как казалось в последние несколько десятилетий, путем, которым должна следовать полупроводниковая промышленность. В частности, приближение топологических норм к пределу в 3 нм настоятельно требует использования революционной технологии, которая позволила бы преодолеть ограничения закона Мура за счет повышения соотношения цены и качества благодаря применению новых наноматериалов или использованию дополнительных функций при повышении степени интеграции устройств. Применение концепции «Больше, чем Мур» к повышению разнообразия и универсальности дает толчок еще одному направлению исследований по продвижению информационных технологий за счет быстрого развития носимых интеллектуальных устройств и систем, искусственного интеллекта, биомиметической электроники, нейроморфных транзисторов, адаптивных интерактивных интерфейсов и систем с автономным питанием [1, 2]. Устройства и интеллектуальные системы «больше, чем Мур», включающие в себя источники питания, силовую электронику, многофункциональные датчики и радиопередатчики, становятся все более заметными благодаря функциональной диверсификации при проведении системной интеграции и высокому соотношению цена/производительность. Среди потенциальных устройств и интеллектуальных систем «больше, чем Мур» бумажная электроника является отличным кандидатом на многофункциональную, адаптивную, высокопроизводительную и недорогую интеграцию.

Бумага, безусловно, является самым дешевым и широко доступным гибким материалом в повседневной жизни. Цена бумаги ($\approx 0,1$ цента/дм²) существенно ниже, чем у пластиковых подложек, таких как полиэтилентерефталат (ПЭТФ, ≈ 2 цента/дм²) и полиимид (ПИ, ≈ 30 центов/дм²). Бумага помимо этого обладает такими преимуществами, как быстрая разлагаемость и возможность переработки. Скорость процесса рулонного производства бумаги (R2R) иногда превышает 100 км/ч. Кроме того, бумага также является экологически чистой, поскольку она пригодна для вторичной переработки и изготовлена из возобновляемого сырья. Как известно, бумага используется в основном для упаковки, а также для отображения и хранения информации в традиционных отраслях промышленности. В последние годы бумажная электроника привлекла значительное внимание благодаря таким уникальным характеристикам подложек из сопряженной бумаги, как механическая гибкость/сгибаемость, устойчивость, способность к биологическому разложению, малый вес, низкая стоимость и т. д. Она позволяет получать отличные прототипы систем на кристалле с простой модульной конструкцией и потенциальными



Рис. 1. Устойчивые бумажные чипы и модули, включающие в себя устройства сбора энергии, устройства накопления энергии и функциональные схемы

характеристиками энергонезависимости. К данным прототипам можно отнести печатные платы на бумажной основе, гибридную электронику/микрофлюидику, нано/микроэлектромеханические системы и различные сборщики энергии. Энергоэффективность бумажной электроники также стала важной задачей/целью, позволяющей избежать многих неудобств и решить возможные проблемы загрязнения, связанные с традиционными источниками питания, а также создать ожидаемую энергонезависимую систему (т. е. устойчивую бумажную электронику).

Как правило, устойчивая работа интегрированной бумажной электроники может быть обеспечена следующими базовыми компонентами: 1) сборщиками энергии на основе трибоэлектрических наногенераторов, пьезоэлектрических преобразователей, термоэлектрических устройств или фотогальваники; 2) накопителями энергии с суперконденсаторами или аккумуляторами; 3) функциональной электроникой и схемами с низким энергопотреблением (рис. 1) [3]. Кроме того, устойчивая бумажная электроника может быть востребована для разработки энергоэффективных нейроморфных бумажных чипов за счет использования 4) передовых нейроморфных компонентов на основе традиционных бумажных транзисторов, памяти и логических элементов с возможностью создания приложений с вычислениями в памяти. Рабочий процесс устойчивой бумажной электроники также подразумевает циркуляцию энергии, включающую в себя преобразование окружающей энергии, накопление электрохимической энергии и использование энергии в функциональных схемах (в виде фотонной, тепловой, электромагнитной или механической энергии) (рис. 2). Устойчивая бумажная электроника представляет собой новую парадигму для адаптивных и энергонезависимых функциональных схем, позволяющих приблизиться к созданию эффективной, экономичной и специализированной интегративной электроники, и дополняющих ее систем с автономным питанием.

Преимущества бумажных материалов

Растущий интерес к использованию бумаги в гибкой электронике обусловлен природными свойствами и уникальными/перспективными структурными характеристиками бумаги (рис. 3) [4–6]: 1) бумага повсеместно доступна и относится к возобновляемым ресурсам с низкой стоимостью; 2) бумага является биосовместимой, биоразлагаемой и горючей, благодаря чему ее можно безопасно утилизировать путем сжигания, что сокращает объем электронных отходов; 3) жидкие вещества на бумажной подложке могут течь по определенным каналам за счет капиллярного действия без воздействия внешних сил; 4) свойства (например, гидрофильность и проницаемость) бумажной матрицы могут быть адаптированы к индивидуальным требованиям; 5) трехмерная пористая структура с большой площадью поверхности, создаваемая по всей толщине бумаги, позволяет легко впитывать функциональные реагенты, а главное, дает возможность избирательно обрабатывать две стороны бумаги с получением разных или одинаковых



Рис. 2. Рабочий процесс устойчивой бумажной электроники также подразумевает циркуляцию энергии, включающую в себя преобразование окружающей энергии, накопление электрохимической энергии и использование энергии в функциональных схемах (в виде фотонной, тепловой, электромагнитной или механической энергии)



Рис. 3. Преимущества бумаги

функций; 6) основной композит (целлюлоза) бумаги, нерастворимый в классических органических растворителях придает ей отличную химическую стойкость; и 7) бумага, состоящая только из целлюлозы, может демонстрировать более высокую стабильность размеров при изменении температуры и более низкое тепловое расширение по сравнению с большинством пластиков, что делает ее более функциональной (или пригодной к эксплуатации) ее при повышенных температурах.

Процесс обеспечения проводимости бумаги

Бумага с ее пористой структурой, состоящей в основном из произвольно связанных между собой целлюлозных волокон, способствует иммобилизации активных веществ и диффузии водных растворов. При этом важную роль в разработке и изготовлении электронных переключателей и систем микроанализа играет капиллярное действие, обеспечиваемое гидрофильностью и пористостью целлюлозы. Поскольку для электронных устройств требуются гибкие подложки



Рис. 4. Процесс обеспечения проводимости бумаги

с хорошей проводимостью, важно трансформировать изоляционные свойства, присущие бумаге с высоким содержанием целлюлозы, и повысить ее проводимость, что позволит удовлетворить требования функциональных приложений. На сегодняшний день разработано множество производственных методов, стратегий модификации, принципов работы и применений. Удивительно, но даже самые простые и низко затратные производственные процессы могут наделять коммерческую бумагу специальными функциями, обеспечивающими возможность ее практического применения. Далее приведен обзор нескольких типовых методов модификации (рис. 4).

1) Вакуумная фильтрация. Вакуумная фильтрация представляет собой легко масштабируемый, недорогой и простой процесс, широко используемый для изготовления отдельных бумажных проводящих пленок. Установка вакуумной фильтрации обычно состоит из воронки Бюхнера, фильтрующей мембраны и вакуумной системы. При изготовлении проводящей бумаги использовались различные типы фильтрующих мембран, такие как мембраны из анодированного оксида алюминия, поливинилиденфторида (ПВДФ), политетрафторэтилена (ПТФЭ) и целлюлозы [7].

2) Нанесение пером: Этот метод позволяет переносить на подложку проводящие материалы с помощью простых действий по написанию, что особенно подходит для производства специализированной бумажной электроники. Используя только обычные канцелярские товары, можно за несколько минут спроектировать и изготовить различные электронные компоненты. Метод нанесения пером в зависимости от различных материалов, используемых для нанесения рисунка, можно разделить на «рисование карандашом» и «нанесение пером своими руками». Коммерческие наполнители для карандашей изготавливаются путем смешивания графита и глины в определенной пропорции. Схемы и электроды можно легко и быстро изготовить (без использования растворителей), нарисовав их на бумаге карандашом. Эти графитовые отпечатки механически прочны, легки, экологически безопасны и устойчивы к химической коррозии, теплу и излучению. В последние годы различные типы электроники, такие как датчики влажности, датчики давления и наногенераторы, были созданы путем рисования их карандашом на бумажных подложках. Полученные гибридные графитовые пористые структуры на бумажном волокне могут работать как пассивные проводящие электроды и активные чувствительные материалы. Их электропроводность в основном зависит от содержания графита, шероховатости бумаги и режимов рисования [8].

3) Нанесение с помощью стержня Майера: Нанесение покрытия с помощью стержня Майера является хорошо известным методом нанесения покрытия, широко используемым в лакокрасочной промышленности для получения тонких пленок непрерывным и контролируемым образом. Стержень Майера представляет собой металлический стержень с намотанной на него проволокой, используемый для нанесения раствора на поверхность подложки. Толщину проводящей пленки определяет диаметр намотанной на стержень проволоки. Применение этого метода для

получения проводящей бумаги позволяет изготавливать проводящие слои большой площади с настраиваемой толщиной [9].

4) Трафаретная печать. Трафаретная печать сильно отличается от других традиционных методов печати. Слой чернил наносят по поверхности трафарета и выдавливают через открытые поры сетчатого рисунка на подложку. Трафаретная печать часто используется как технология листовой печати в серийных процессах, но ее также можно адаптировать к процессу R2R ротационной трафаретной печати, обеспечивающему довольно высокую производительность. Используя этот метод для создания токопроводящего слоя на бумаге, можно быстро и в больших количествах получать токопроводящие дорожки с определенной морфологией [10].

5) Локальное выращивание на затравках: Локальное выращивание на затравках — это эффективный способ по улучшению как взаимодействия, так и контроля архитектур создаваемых продуктов путем воздействия на процесс роста. Как правило, перед экспериментом синтезируют затравочный раствор металла с помощью простой реакции восстановления с использованием в качестве восстановителя NaBH_4 , тринатриевого цитрата, гидрохлорида гидроксилamina или аскорбиновой кислоты. Затем свежеприготовленный затравочный раствор капают в гидрофильную область и выдерживают в окружающей среде до тех пор, пока бумажная подложка не высохнет. Несколько раз повторив этот процесс, подложки тщательно промывают водой и добавляют свежеприготовленный водный ростовой раствор. Наконец, после повторной промывки водой получают сплошные и плотные проводящие бумажные электроды с выдающимися электрохимическими характеристиками [11].

6) Полимеризация: полимеризация является альтернативой выращиванию благородных металлов для применения в бумажной электронике. Грубая и пористая структура целлюлозной бумаги позволяет легко ее модифицировать сопряженными полимерами путем образования водородных связей с добавленными полимерными мономерами. Электропроводность проводящих полимеров может быть изменена путем «легирования» с помощью химических или электрохимических окислительно-восстановительных реакций и протонирования (или, говоря по-другому, с применением легирующих примесей), с сохранением при этом неотъемлемых характеристик, присущих традиционным полимерам, таких как простота синтеза и гибкость обработки [12].

7) Прямое лазерное экспонирование (лазерная графитизация): Прямое лазерное экспонирование — это полностью твердотельный подход, простой и масштабируемый, позволяющий преобразовывать углеродный материал в высокопроводящий графен. Гравировальный лазер одновременно испаряет и отслаивает углеродный материал, формируя открытую пористую матрицу графена. Кроме того, этот метод позволяет также точно контролировать форму конечных изделий путем создания различных шаблонов, широко используемых при создании миниатюрных устройств накопления энергии [13].

В дополнение к вышеупомянутым методам также доступны методы магнетронного напыления, фотолитографии и печати, которые могут быть использованы для получения на бумаге проводящих слоев с хорошими характеристиками, что является необходимым условием для изготовления устойчивой и функциональной электроники на основе бумаги. Различные процессы позволяют получать на бумаге разнообразные проводящие дорожки, и в сочетании с присущими бумаге свойствами электроника на основе бумаги способствует созданию революционных гибких электронных устройств в диапазоне от сбора и накопления энергии до функциональных схем. В следующем разделе будет дано подробное описание различных бумажных функциональных электронных устройств.

Разнообразие гибкой электроники на основе бумажных матриц

Портативные и устойчивые электронные устройства с уникальными характеристиками, основанные на использовании различных электронных компонентов на обычных бумажных носителях,

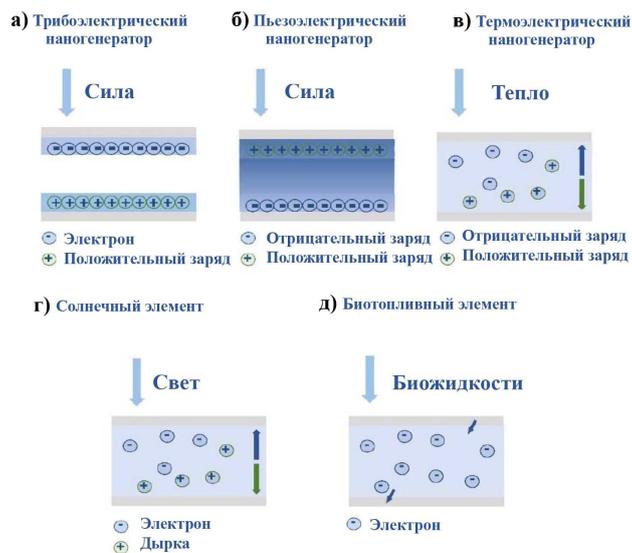


Рис. 5. Схема устройств сбора энергии на бумажной основе: а) Трибоэлектрический наногенератор (ТЭНГ); б) Пьезоэлектрический наногенератор (ПЭНГ); в) Термоэлектрический наногенератор (ТЭГ); г) Солнечный элемент; д) Биотопливный элемент

представляют собой привлекательную концепцию. Выдающиеся характеристики целлюлозы позволяют конструировать разнообразные и эффективные электронные системы. Кроме того, все часто используемые функции, такие как выработка/подача электроэнергии, индикатор выполнения и отображения процесса, считывание результатов и даже обратная связь, выполняемые обычно различными устройствами, могут быть интегрированы в одну бумажную платформу. Появляется тенденция к разработке новых физических концепций использования бумаги для получения характеристик, превосходящих наше воображение. Для успешного внедрения устойчивой бумажной электроники требуются следующие функциональные устройства, определенные на основе принципов ее работы и потребностях в реализуемых функциях: 1) устройства сбора энергии (например, наногенераторы (НГ), элементы сбора энергии), 2) устройства накопления энергии (например, суперконденсатор, аккумулятор), 3) функциональные схемы и датчики и 4) информационные устройства (например, транзистор, память, логический вентиль), используемые для потенциальной нейроморфной инженерии/вычислений.

Сборщики энергии на бумажной основе

Сборщики энергии на бумажной основе могут легко преобразовывать энергию окружающей среды (например, механическую энергию, тепло, свет и биохимическую энергию) в электричество.

Трибоэлектрические наногенераторы (ТЭНГ). ТЭНГ, предложенный Wang's Group в 2012 году, основан на использовании тока смещения Максвелла. Он позволяет легко собирать механическую энергию, используя трибоэлектрический эффект, путем сопряжения контактной электризации и электростатической индукции (рис. 5а) [14]. Размыкание контактов между двумя материалами вызывает перенос заряда между поверхностями, в результате чего происходит перетекание зарядов или электронов через внешние цепи для поддержания электростатического равновесия. Таким образом, ТЭНГ генерирует переменный электрический ток. Бумага может использоваться в качестве материала подложки или материала положительного трибоэлектрического слоя для ТЭНГ, что позволяет придать устройству превосходную гибкость, растяжимость и универсальность [15].

Пьезоэлектрические наногенераторы (ПЭНГ). В ПЭНГ на основе нецентросимметричных пьезоэлектрических материалов используется прямой пьезоэлектрический эффект, связанный

с изменением электрической поляризации, вызванным нарушением центральной симметрии кристаллической структуры (рис. 5б) [1, 16]. Зависимое от механического напряжения изменение поляризации приводит к появлению внутренней разности потенциалов в материале, действующей в качестве ЭДС для потока электронов во внешних цепях при создании переменного тока. Плотность поляризованного заряда определяется пьезоэлектрическим коэффициентом материалов и приложенным механическим напряжением [7].

Термоэлектрические генераторы (ТЭГ). ТЭГ преобразуют тепловую энергию в электрическую за счет эффекта Зеебека или Соре (рис. 5в). Градиент температуры между двумя электрически соединенными проводниками или полупроводниками вызывает диффузию носителей заряда или ионов от горячей стороны, что приводит к возникновению термопотенциала и постоянного тока во внешней цепи. Использование бумаги в качестве подложки для термоэлектрических генераторов позволяет улучшить упругость термоэлектрических генераторов на бумажной основе, которая будет определяться конструктивным исполнением ТЭГ и зависеть только от термической обработки бумаги [17].

Солнечные элементы. Солнечные элементы преобразуют энергию света в электричество за счет фотогальванических эффектов (рис. 5г). Типичный солнечный элемент содержит активные слои, селективные слои и электроды. Свет поглощается активными слоями, генерируя электронно-дырочные пары или экситоны, которые впоследствии разделяются встроенным потенциалом, а затем собираются электродами через селективные или транспортные слои. При выборе бумаги в качестве подложки для солнечных элементов, пористые свойства бумаги обеспечивают ее надежное соединение с материалом активного слоя, обеспечивая хорошую работу солнечного элемента на бумажной основе [18].

Биотопливные элементы (БТЭ). В последнее время значительный интерес вызывает новая технология БТЭ, позволяющая легко преобразовывать химическую энергию биоразлагаемых органических веществ в электрическую энергию. Вместо дорогих металлических катализаторов, используемых в электрохимических аккумуляторах, биологические окислительно-восстановительные реакции в БТЭ катализируются возобновляемыми ферментами или микроорганизмами, что обеспечивает чистую энергетическую альтернативу элементам сбора энергии (рис. 5д). В биотопливном элементе окисляющий биокатализатор способствует реакции окисления на биоаноде и реакции восстановления на биокатоде, что заставляет электроны течь во внешней цепи и создавать электрический ток. Выходной ток в основном зависит от концентрации химического топлива в биожидкостях и эффективности переноса электронов между биокатализатором и электродом. Применение бумаги в биотопливных элементах привлекает все большее внимание ввиду того, что ее пористая структура может легко обеспечить хорошие реакционные каналы [19].

Накопители энергии на бумажной основе

Суперконденсаторы (СК). СК накапливают электрические заряды за счет обратимой электростатической адсорбции ионов электролита или окислительно-восстановительных фарадеевских реакций на поверхности. Гибкий суперконденсатор состоит из двух электродов с токоъемниками, электролита и сепаратора. Конденсаторы с двойным электрическим слоем работают за счет обратимой электростатической адсорбции ионов на поверхности или пористой структуре углеродных материалов с большой площадью поверхности без какой-либо химической реакции (рис. 6а). Псевдоконденсаторы накапливают энергию за счет поверхностных окислительно-восстановительных реакций на электродах из оксида переходного металла, карбида, нитрида или проводящего полимера (рис. 6б). Бумагу можно использовать в качестве подложки для суперконденсаторов, которая позволяет очень хорошо связывать углеродные материалы или другие реагенты благодаря своей пористой природе. Бумага также может использоваться в качестве сепаратора для суперконденсаторов с целью селективного пропускания веществ после определенных обработок, что делает суперконденсаторы на бумажной основе очень привлекательными в последние годы [20].

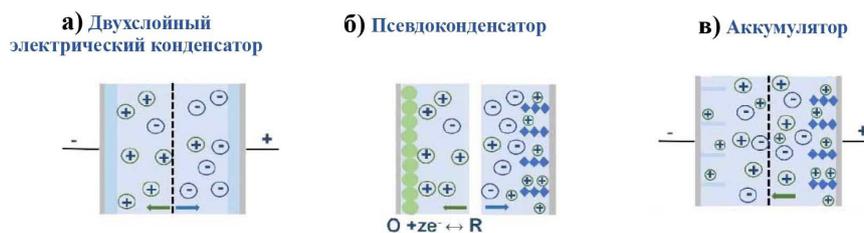


Рис. 6. Схема бумажных устройств накопления энергии: а) Двухслойный электрический конденсатор; б) Псевдоконденсатор; в) Аккумулятор

Аккумуляторы. Перезаряжаемые аккумуляторы или аккумуляторные батареи накапливают энергию за счет обратимых электрохимических окислительно-восстановительных реакций в электродах под действием приложенного напряжения и тока (рис. 6в). Поскольку химические реакции происходят внутри электродных материалов, аккумуляторы могут обеспечивать очень высокую плотность энергии. Эффективными стратегиями увеличения способности аккумулятора к накоплению энергии являются увеличение разности химических потенциалов между анодом и катодом, использование наноматериалов, а также стабильного электролита, устойчивого к высокому напряжению. Подобно суперконденсаторам на бумажной основе, бумагу также можно использовать в качестве подложки или сепаратора аккумулятора, что позволяет получать аккумуляторы на бумажной основе, обладающие хорошей гибкостью [21].

Функциональные устройства и схемы на бумажной основе

Энергоэффективные интеллектуальные системы, включающие в себя современную электронику, схемы и источники питания, быстро стали незаменимыми для широкого круга применений. Электроника на основе бумаги хорошо согласуется с более общей тенденцией по переходу к «зеленой» промышленности, обеспечивающей интеллектуальное решение для клиентов, живущих в зарождающейся эре больших данных, основанной на искусственном интеллекте. На самом деле, электронные или оптоэлектронные компоненты, созданные на повсеместно доступной, легкой и биоразлагаемой бумаге или бумагоподобных подложках, делают возможным их широкое применение. Был предложен энергонезависимый бумажный модуль, включающий в себя сборщик энергии, схемы управления питанием, блоки накопления энергии и специальные функциональные схемы [3], представляющий собой прототип устойчивых электронных устройств и систем (рис. 7а).

Электроды и функциональные схемы. В отличие от обычной электроники для бумажных электронных устройств крайне необходимы надежные гибкие электроды и схемы, заменяющие использовавшиеся ранее металлические элементы (например, фольгу из алюминия, титана, меди и сплавов) и некоторые пластмассы. Таким образом, можно эффективно устранить очевидные недостатки традиционных подложек, в том числе большую массовую плотность, легкое окисление и плохое сродство между активными материалами и пластиковой матрицей. Из-за присущей целлюлозным волокнам изолирующей способности перед созданием электронных устройств для обеспечения электропроводности подложек требуется нанесение проводящих слоев или добавление проводящих наполнителей на их поверхность. Типичные электропроводящие материалы, используемые при изготовлении бумажных компонентов, можно разделить на пять категорий: благородные металлы, оксиды металлов, сопряженные полимеры, ионные жидкости и материалы на основе углерода. Функциональная схема — это общий термин для различных электронных схем, обычно получаемых путем создания токопроводящих дорожек на бумаге с использованием упомянутой выше обработки. Данные схемы могут быть очень хороши для передачи сигнала между различными основными электронными компонентами (рис. 7б). В качестве примера функциональной схемы на бумажной основе, создаваемой путем построения проводящей цепи,



Рис. 7. Схема бумажных устройств — функциональные схемы и датчики: а) Рабочий процесс для устойчивой бумажной электроники; б) Функциональные схемы; в) Сенсоры на бумажной основе

можно привести простейшую схему включения одного или нескольких светодиодов на бумажной подложке. Сложные функциональные схемы, демонстрирующие более сложные функции, могут быть реализованы путем интеграции на бумаге нескольких электронных компонентов, таких как переливающиеся светодиоды, беспроводные излучатели, светочувствительные схемы, схемы мелодичного освещения и т. д. [3]. Для повышения энергоэффективности сборщиков энергии на бумажной основе напрямую питающих (или заряжающих) бумажные электронные устройства, решающее значение для создания устойчивой бумажной электроники имеет создание соответствующей схемы управления питанием на бумаге.

Разнообразные датчики. Существуют различные типы датчиков, способные в простейшей форме обратимо или необратимо реагировать на воздействие какого-либо внешнего фактора (например, влажности, газа, давления/деформации). Наиболее важными свойствами датчика являются его специфичность, чувствительность, перекрестная чувствительность и стабильность. Хорошо зарекомендовало себя в течение длительного времени использование пропитанной бумаги (универсальной индикаторной бумаги) для измерения pH. Сегодня бумага также рассматривается в качестве потенциальной подложки в микрофлюидных устройствах при проведении медицинского зондирования («бумажная жидкость» и «лаборатория на бумаге») с целью диагностики, а также других видов биоактивного зондирования. Если к таким бумажным датчикам можно добавить электронные функциональные схемы, то становится ясно, что это позволит провести обширные разработки с целью создания более интеллектуальных датчиков на бумажной основе, способных измерять несколько аналитов с высокой чувствительностью.

Датчики влажности на бумажной основе. В датчике влажности бумага действует не только как активный чувствительный материал, но и как подложка. Целлюлозная бумага гигроскопична по своей природе. Когда бумага вступает в контакт с влажной средой, молекулы воды адсорбируются на ее поверхности, образуя слабые связи с гидроксильными группами. В результате эффективная диэлектрическая проницаемость увеличивается. Изменение диэлектрической проницаемости в бумаге значительно больше, чем в воздухе из-за концентрированной адсорбции молекул воды на поверхности бумаги. Таким образом, общая емкость датчика изменяется в зависимости от изменения влажности [8].

Датчики газа на бумажной основе. Датчики газа на бумажной основе являются интригующими и многообещающими, хотя их исследование все еще находится в зачаточном состоянии. Поскольку бумага является недорогой, изолирующей, гибкой и легко переносимой, она была признана особым классом поддерживающей матрицы для размещения материалов, чувствительных к влажности. При этом необходимо еще внести ряд изменений, которые позволили бы улучшить характеристики определения влажности по следующим аспектам: 1) Чувствительные материалы всегда наносятся на бумажные поверхности, что может ухудшить механическую стабильность бумажной подложки и непрерывность активной сенсорной сети. 2) Увеличение чувствительной

области повышает адсорбционную способность, но при этом изменяется также и сопротивление, что может повлиять на чувствительность. 3) Диспергируемую чувствительную жидкость обычно готовят путем связывания химических веществ с поверхностью бумаги, что может препятствовать прямому контакту молекул газа с активным чувствительным слоем. Кроме того, дальнейшее развитие датчика газа на бумажной основе также следует рассматривать с точки зрения основных параметров обнаружения, например, отклика, чувствительности, времени отклика/восстановления, селективности, предела обнаружения и стабильности [22].

Датчики давления/деформации на бумажной основе. В последнее время многих исследователей привлекли внимание датчики давления, предназначенные для применения в носимых устройствах и электронной коже и обладающие уникальными свойствами. Важной задачей в рамках этой темы является создание датчиков давления/деформации, обладающих как высокой чувствительностью, так и большим рабочим диапазоном (рис. 7в). Конструкция датчиков давления/деформации на бумажной основе проста, экономична, масштабируема и не требует сложного оборудования. Такие устройства позволяют обнаруживать динамические силы в широком диапазоне давления/деформации и определять их признаки или направление действия (например, сдавливание, кручение и изгиб). Эти признаки позволяют в режиме реального времени и на месте отслеживать силовые реакции в реальном мире от дыхания, пульсации запястья и даже акустических вибраций. Ожидается, что включение бумаги в датчики давления/деформации обеспечит в будущем возможность их легкой интеграции с умной носимой электроникой (например, гибкими сенсорными экранами, интерфейсами «человек-машина» и даже кожными протезами) [23].

Органические полупроводниковые устройства на бумажной основе для современной нейроморфной инженерии/вычислительных устройств

Идея «печати» электроники на гибких бумажных и пластиковых подложках не нова. До сих пор печатная гибкая электроника делала первые шаги из исследовательских лабораторий к коммерческому применению. Развитие в течение последних десятилетий электронных и оптоэлектронных устройств, основанных на обрабатываемых в растворе π -сопряженных органических молекулах и полимерах, возродило интерес к электронике, изготовленной на недорогих гибких пластиковых и бумажных подложках. Хотя действительно сложно изготавливать электронные устройства, такие как органические диоды или транзисторы, требующие обычно молекулярно-гладких интерфейсов, непосредственно на бумажных подложках, недавно появились обнадеживающие сообщения об электронных устройствах, изготовленных непосредственно на бумажных подложках (для некоторых применений шероховатая и пористая поверхность бумаги даже выгодна). Благодаря использованию массовой печати R2R на протяжении всего производственного процесса и недорогих электронных материалов, экономичная бумажная электроника может войти в повседневную жизнь.

Транзисторы

Органические полевые транзисторы (ОФЕТ, рис. 8а). В связи с впечатляющим развитием органических материалов ОФЕТ вызвали значительный интерес в органической электронике из-за их легкости, высокой гибкости, простоты изготовления и низкой стоимости. Хотя в области создания ОФЕТ были достигнуты значительные успехи, присущий им недостаток, заключающийся в относительно больших каналах и низкой подвижности носителей в органических полупроводниках, затрудняют выполнение требований по их применению на высокой рабочей частоте и с высоким выходным током при низком рабочем напряжении. Чтобы воспользоваться преимуществами низкой стоимости бумажных подложек, основные материалы (особенно органические полупроводники) для ОФЕТ настоятельно рекомендуется печатать. Применяя толстый гибридный диэлектрик (> 2 мкм) с высокой диэлектрической проницаемостью или используя сглаживающие барьерные слои, ОФЕТ можно легко напылять и наносить центрифугированием на подложки из коммерческой фотобумаги и хлопковой бумаги с результирующей среднеквадра-

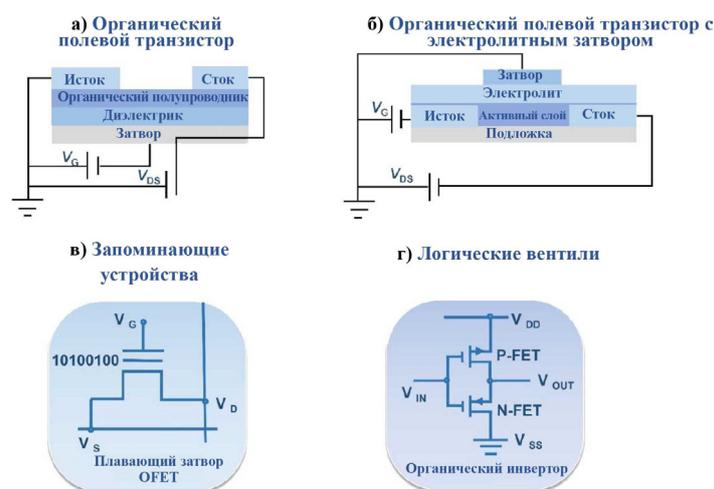


Рис. 8. Схема бумажных информационных устройств: а) Органический полевой транзистор (OFET); б) Органический полевой транзистор с электролитным затвором (OEGT); в) Органический светоизлучающий диод (OLED); г) Запоминающие устройства; д) Логические элементы

точной шероховатостью около 10 нм. Бумага также непосредственно использовалась в качестве диэлектрика затвора, обеспечивающего низковольтную работу OFET, что позволило создать новое поколение недорогих и одноразовых аналоговых и цифровых электронных схем [24].

В последнее время органические синапсы рассматриваются в качестве многообещающих компонентов нейроморфных электронных устройств, включая искусственный разум и электронные сенсомоторные нервы [25]. Органические материалы имеют много преимуществ, включая применимость к ним как процессов печати раствором, так и микроструктурирования (или нанолитографии), биосовместимость, механические свойства, необходимые для перспективной носимой и биосовместимой электроники и робототехники, а также простоту настройки молекулярных свойств. Органические синаптические устройства на бумажной основе сохраняют простую конфигурацию устройства и низкое энергопотребление, сравнимое с потреблением энергии биологическим синапсом ($\sim 1\text{--}10$ фДж/синаптическое событие). Эти выгодно их отличает от нейронов на основе кремниевых схем, в которых синапсы состоят из нескольких транзисторов и конденсаторов со сложной конфигурацией схемы и потребляют относительно большое количество энергии. Устойчивые органические синаптические устройства на бумажной основе наиболее впечатляющие характеристики демонстрируют при проведении нейроморфных вычислений недорогим и энергоэффективным способом.

Органические полевые транзисторы с электролитным затвором (OEGT) – OEGT предлагают эффективный способ решения проблем шероховатости поверхности бумажной электроники за счет включения в структуру устройства мобильных ионов. OEGT менее чувствительны к шероховатости поверхности из-за однородного потенциала вблизи границы раздела диэлектрик/полупроводник, образованной двойными электрическими слоями (рис. 8б). Кроме того, ионопроводящие и электронно-изолирующие электролиты на основе целлюлозной бумаги, в которых используются целлюлозные гели с различными ионными жидкостями, обладают такими привлекательными свойствами, как прозрачность, гибкость, метастабильность и высокая емкость. Это открывает путь к использованию бумаги в качестве электролитного затвора для OEGT в области гибкой электроники [26]. Примечательно, что OEGT, способные преобразовывать биологические и биохимические данные в усиленные электронные сигналы и стабильно работающие в водной среде, недавно стали фундаментальными строительными блоками в биоэлектронных и нейроморфных устройствах [27].

Органические запоминающие устройства (рис. 8в). С использованием адаптируемых органических электронных материалов в качестве каналов и материалов для хранения памяти на основе OFET стала одной из наиболее многообещающих технологий хранения данных и получила применение в различных новых запоминающих устройствах, таких как сенсорная память, память хранения и устройства нейроморфной обработки данных. При этом возникновение узкого места фон Неймана является естественным результатом использования шины для передачи данных между подсистемами памяти. Обмен данными между различными уровнями иерархии памяти обычно сопряжен со значительными задержками и энергопотреблением в связи с анализом неструктурированных данных, обработкой больших изображений и решением других задач искусственного интеллекта. В связи с этим крайне желательно применение новых технологий для энергонезависимой памяти, позволяющих выполнять параллельные вычисления. Использование энергонезависимой памяти в качестве искусственного синапса для реализации нейронных систем (по аналогии с человеческим мозгом) стало очень привлекательным в качестве потенциальной возможности для будущих нейроморфных вычислений [28]. Кроме того, память на основе OFET может быть выполнена на бумаге с целью модуляции многоуровневых энергонезависимых состояний тока сток-исток путем поляризации распределенного домена сегнетоэлектрического слоя на полупроводниковом канале [29]. Органическое запоминающее устройство на бумажной основе не только имеет множество преимуществ, таких как низкая стоимость, способность к биологическому разложению и возобновляемость ресурсов, но также ожидается, что оно будет использоваться в качестве одноразового диагностического биосенсора для хранения персональных данных о состоянии здоровья в повседневной жизни и обеспечения хорошей защиты конфиденциальности благодаря возможности легкого физического уничтожения в технологии «Интернет всего».

Органические логические вентили. OFET могут использоваться в качестве элементов управления матрицей в дисплеях, а также в качестве логических элементов в цифровых электронных схемах. Органический логический инвертор может быть получен путем простого соединения органического транзистора с резистором или транзистором (нагрузкой). Если инвертор имеет коэффициент усиления ($dV_{OUT}/dV_{IN} > 1$), его можно использовать в качестве усилителя или в качестве строительного блока для более сложных схем, таких как кольцевые генераторы, триггеры, регистры сдвига, дешифраторы строк, генераторы кодов и цепи транспондера. Кольцевой генератор получается путем соединения входа с выходом нечетного числа инверторов. Низкое энергопотребление и мощный выход обычно достигаются за счет использования дополнительных схем, то есть объединения р- и n-канальных OFET (рис. 8г). Электрически реконфигурируемые органические логические схемы также являются многообещающими кандидатами для реализации новых вычислительных архитектур, таких как искусственный интеллект и нейроморфные устройства [30].

Перспективы бумажных нейроморфных чипов с интегрированными датчиками, запоминающими и вычислительными устройствами

Современные вычислительные системы, в том числе системы искусственного интеллекта и нейроморфные компьютеры, крайне необходимы для грядущего общества, использующего Интернет вещей. Это связано с растущим спросом на высокопроизводительную обработку данных и низкое энергопотребление. Органические интегральные схемы на бумажной основе весьма перспективны для такой передовой нейроморфной инженерии/вычислений (рис. 9) [31–33]. Это связано с тем, что их уникальные характеристики (механическая гибкость, малый вес и дешевое производство) позволяют использовать новые архитектуры устройств (например, печатные и переносные нейронные логические схемы), которые не могут быть получены с помощью современной электроники на основе кремния. Однако органические устройства на бумажной основе

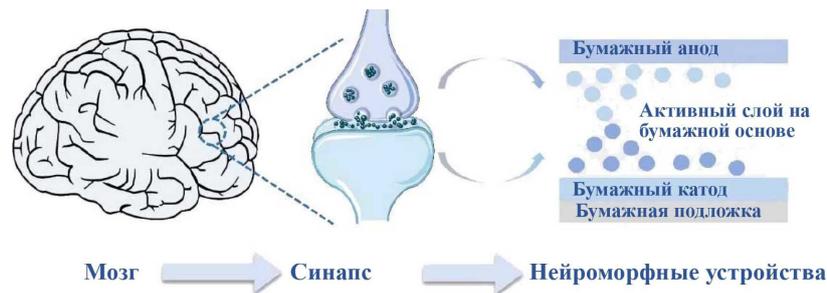


Рис. 9. Устойчивая бумажная электроника для передовой нейроморфной инженерии/вычислительных устройств

страдают от трудностей, связанных с необходимостью минимизации использования электронных компонентов из-за их несовместимости с обычными методами литографии. Следовательно, логические схемы по-прежнему имеют низкую степень интеграции и плохие возможности по обработке данных. Для решения этой проблемы предлагается два решения.

1) Реконфигурируемые логические схемы, представленные программируемыми логическими интегральными схемами, потенциально могут обеспечить смену концепции и позволят отказаться от компьютерной архитектуры фон Неймана. Причина в том, что реконфигурируемость, которая является наиболее привлекательной характеристикой этих устройств, должна обеспечить параллельную и высокоскоростную обработку данных, низкое энергопотребление и широкомасштабную интеграцию электронных компонентов за счет использования преимуществ разнообразных и гибких схем на отдельных аппаратных уровнях. Это необходимые характеристики для грядущей "эры больших данных".

2) Вычисления в памяти также могут стать альтернативой архитектуры фон Неймана. Вычисления в памяти, впервые предложенные в 1960-х годах, могут иметь простую структуру и более высокую скорость вычислений без необходимости перемещения данных за пределы структуры. Однако данному направлению не уделялось должного внимания, вероятно, из-за значительного повышения вычислительных возможностей, вызванного быстрым развитием транзисторов за последние несколько десятилетий. Появляющаяся устойчивая бумажная электроника, особенно интегрированные бумажные датчики, транзисторы и память, имеют большой потенциал для реализации концепции вычислений в памяти, предлагая привлекательное решение для снижения энергопотребления и интеграции функций.

Грядущие инновации, основанные на использовании гибкой/растяжимой/носимой электроники, а также необходимости поддержки индустрии больших данных и Интернета вещей (IoT), вдохновили на постоянное стремление к передовым электронным устройствам (например, устройствам сбора энергии, устройствам накопления энергии, функциональным схемам, информационным устройствам) с разнообразной эстетикой, которые могут привести к кардинальным изменениям в нашей повседневной жизни. Для ускорения наступления эры электроники необходима разработка легких и гибких основных электронных компонентов, а также постоянное стремление к высококачественным гибким дисплеям и микросхемам памяти. Таким образом, уделение повышенного внимания к появляющимся разнообразным электронным блокам на бумажной основе даст импульс развитию «зеленой» электроники. Устойчивая бумажная электроника и нейроморфный бумажный чип, предусматривающий использование сборщика энергии, накопителя энергии и многофункциональности, обладают большим потенциалом для создания энергоэффективной искусственной сенсорной памяти и нейроморфных вычислительных устройств, необходимых для искусственного интеллекта будущего, предоставляя многообещающие альтернативы для преодоления традиционного узкого места фон Неймана.

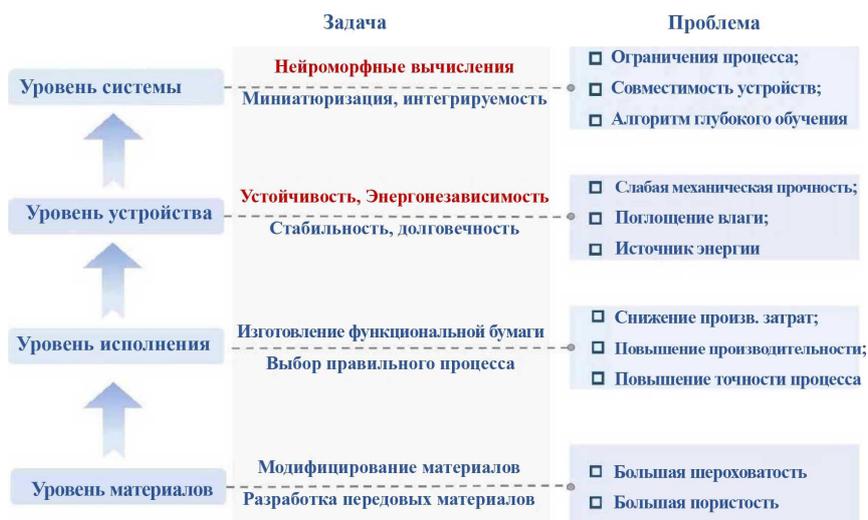


Рис. 10. Заключительные замечания по устойчивой бумажной электронике

Заключительные замечания и перспективы

Устойчивая бумажная электроника открывает большие возможности для производства недорогих, маломощных и функциональных электронных устройств, начиная от базовых электронных компонентов и заканчивая интегрированными платформами. Хотя эта технология обладает очевидными достоинствами, исследование более портативной и автономной бумажной электроники все еще находится в зачаточном состоянии, а для ее внедрения все еще остаются некоторые серьезные проблемы и препятствия (рис. 10).

1. *Пористая структура.* Здесь следует подчеркнуть, что присущая бумаге внутренняя пористая структура ее поверхности будет влиять на топологические нормы производимого электронного устройства, поскольку минимальные размеры проводящих дорожек зависят от свойств бумаги и метода, используемого для изготовления в бумаге гидрофобных каналов.

2. *Передовые материалы.* Передовые материалы оказывают большое влияние на физические характеристики, структурную точность, топологические нормы и функциональность, поэтому для улучшения свойств и исследования новых функций, требуемых для обеспечения устойчивости бумажной электроники, необходимо появление новых революционных материалов.

3. *Стабильность, долговечность и устойчивость.* Механическая прочность бумаги ниже, чем у традиционных материалов (металлов, стекла и пластика), поэтому для повышения стабильности, долговечности и устойчивости требуется значительный прогресс в развитии технологий изготовления бумаги и интеграции функций.

4. *Влияние влажности.* Проблема влажности может быть решена путем инкапсуляции или ламинирования активных компонентов на бумажной подложке защитными материалами (алюминиевой фольгой, изолирующей краской, пластиковой пленкой и т. д.

5. *Оптимизированные технологии.* Хотя сообщалось о различных подходах к производству электронных устройств на бумаге, тем не менее для обеспечения функциональности и устойчивости бумажной электроники по-прежнему крайне необходима разработка и оптимизация экономически эффективных и простых в использовании методов изготовления и интеграции.

6. *Миниатюрная интегрируемость.* Необходимо разработать и создать миниатюрную, полностью интегрированную, портативную и автономную бумажную электронику. В частности, следует изучить концепции беспроводного сбора энергии и вывода сигнала, что сделает бумажную электронику полностью энергонезависимой и позволит отказаться от лишних проводов.

Исследования в области устойчивой бумажной электроники все еще находятся на ранних стадиях коммерциализации. Для преобразования лабораторных устройств в коммерческие продукты все еще необходимы значительные исследовательские усилия, направленные на развитие этого метода. Для реализации устойчивой бумажной электроники необходим дальнейший прогресс в выборе бумажной подложки и ее функциональной обработке, в методах производства микроустройств и в стратегиях инкапсуляции. Исследователям также настоятельно рекомендуется не жалеть усилий по изучению свойств применяемых в настоящее время бумажных материалов и внедрению функциональных наноструктур в процесс изготовления бумаги. Кроме того, ключом к успешному переходу к коммерческому применению бумажной электроники может стать более глубокое изучение сырья (например, целлюлозы, лигнозы, хитозана) с точки зрения геометрической структуры и химического состава, а не простое использование в качестве функционального носителя коммерческой пористой бумаги. Подводя итог, можно сказать, что наступает новая эра зеленой электроники, в нашу жизнь будет привнесено больше комфорта, и мы только выиграем от всех достижений на этом пути по мере поступательного движения прогресса; что же касается устойчивой бумажной электроники, она будет использоваться для практических приложений и уже не будет главной темой научных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Wang Z.L., Song J. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays. *Science*, 312 (2006) 242–246. 10.1126/science.1124005
- [2] Wu C., Wang A.C., Ding W., Guo H., Wang Z.L. Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Advanced Energy Materials* 9 (2019), 1802906. 10.1002/aenm.201802906
- [3] Han J., Xu N., Yu J., Wang Y., Xiong Y., Wei Y., Wang Z.L., Sun Q. Energy autonomous paper modules and functional circuits. *Energy & Environmental Science*. (2022). 10.1039/d2ee02557d
- [4] Zhang Y., Zhang T., Huang Z., Yang J. A New Class of Electronic Devices Based on Flexible Porous Substrates. *Adv Sci*. 9 (2022), e2105084. 10.1002/advs.202105084
- [5] Zhang Y., Zhang L., Cui K., Ge S., Cheng X., Yan M., Yu J., Liu H. Flexible Electronics Based on Micro/Nanostructured Paper. *Adv Mater* 30 (2018), e1801588. 10.1002/adma.201801588
- [6] Tobjork D., Osterbacka R. Paper electronics. *Adv Mater* 23 (2011), 1935–1961. 10.1002/adma.201004692
- [7] Zhang G., Liao Q., Zhang Z., Liang Q., Zhao Y., Zheng X., Zhang Y. Novel Piezoelectric Paper-Based Flexible Nanogenerators Composed of BaTiO₃ Nanoparticles and Bacterial Cellulose. *Adv Sci* 3 (2016), 1500257. 10.1002/advs.201500257
- [8] Zhao H., Zhang T., Qi R., Dai J., Liu S., Fei T. Drawn on Paper: A Reproducible Humidity Sensitive Device by Handwriting. *ACS Appl Mater Interfaces* 9 (2017), 28002–28009. 10.1021/acsami.7b05181
- [9] Wang J., Liang M., Fang Y., Qiu T., Zhang J., Zhi L. Rod-coating: towards large-area fabrication of uniform reduced graphene oxide films for flexible touch screens. *Adv Mater* 24 (2012), 2874–2878. 10.1002/adma.201200055
- [10] Lin C.H., Tsai D.S., Wei T.C., Lien D.H., Ke J.J., Su C.H., Sun J.Y., Liao Y.C., He J.H. Highly Deformable Origami Paper Photodetector Arrays. *ACS Nano* 11 (2017), 10230–10235. 10.1021/acs.nano.7b04804
- [11] Qi K., He J., Wang H., Zhou Y., You X., Nan N., Shao W., Wang L., Ding B., Cui S. A Highly Stretchable Nanofiber-Based Electronic Skin with Pressure-, Strain-, and Flexion-Sensitive Properties for Health and Motion Monitoring. *ACS Appl Mater Interfaces* 9 (2017), 42951–42960. 10.1021/acsami.7b07935
- [12] Yuan L., Yao B., Hu B., Huo K., Chen W., Zhou J. Polypyrrole-coated paper for flexible solid-state energy storage. *Energy & Environmental Science* 6 (2013). 10.1039/c2ee23977a
- [13] Park H., Kim M., Kim B.G., Kim Y.H. Electronic Functionality Encoded Laser-Induced Graphene for Paper Electronics. *ACS Applied Nano Materials* 3 (2020), 6899–6904. 10.1021/acsanm.0c01255

- [14] **Fan F.-R., Tian Z.-Q., Wang Z.L.** Flexible triboelectric generator. *Nano Energy* 1 (2012), 328–334. 10.1016/j.nanoen.2012.01.004
- [15] **Zhong Q., Zhong J., Hu B., Hu Q., Zhou J., Wang Z.L.** A paper-based nanogenerator as a power source and active sensor. *Energy & Environmental Science* 6 (2013), 1779–1784. 10.1039/C3EE40592C
- [16] **Chen Y., Gao G., Zhao J., Zhang H., Yu J., Yang X., Zhang Q., Zhang W., Xu S., Sun J., Meng Y., Sun Q.** Piezotronic Graphene Artificial Sensory Synapse. *Advanced Functional Materials* 29 (2019), 1900959. 10.1002/adfm.201900959
- [17] **Rojas J.P., Conchouso D., Arevalo A., Singh D., Foulds I.G., Hussain M.M.** Paper-based origami flexible and foldable thermoelectric nanogenerator. *Nano Energy* 31 (2017), 296–301. 10.1016/j.nanoen.2016.11.012
- [18] **Lee C.-P., Lai K.-Y., Lin C.-A., Li C.-T., Ho K.-C., Wu C.-I., Lau S.-P., He J.-H.** A paper-based electrode using a graphene dot/PEDOT:PSS composite for flexible solar cells. *Nano Energy* 36 (2017), 260–267. 10.1016/j.nanoen.2017.04.044
- [19] **Esquivel J.P., Del Campo F.J., Gómez de la Fuente J.L., Rojas S., Sabaté N.** Microfluidic fuel cells on paper: meeting the power needs of next generation lateral flow devices. *Energy Environ. Sci.* 7 (2014), 1744–1749. 10.1039/c3ee44044c
- [20] **Lam D.V., Nguyen U.N.T., Roh E., Choi W., Kim J.H., Kim H., Lee S.M.** Graphitic Carbon with MnO/Mn₇C₃ Prepared by Laser-Scribing of MOF for Versatile Supercapacitor Electrodes. *Small* 17 (2021), e2100670. 10.1002/sml.202100670
- [21] **Zhang C.J., Park S.H., Ronan O., Harvey A., Seral-Ascaso A., Lin Z., McEvoy N., Boland C.S., Berner N.C., Duesberg G.S., et al.** Enabling Flexible Heterostructures for Li-Ion Battery Anodes Based on Nanotube and Liquid-Phase Exfoliated 2D Gallium Chalcogenide Nanosheet Colloidal Solutions. *Small* 13 (2017). 10.1002/sml.201701677
- [22] **Wang J., Zhang X., Huang X., Wang S., Qian Q., Du W., Wang Y.** Forced assembly of water-dispersible carbon nanotubes trapped in paper for cheap gas sensors. *Small* 9 (2013), 3759–3764. 10.1002/sml.201300655
- [23] **Tao L.Q., Zhang K.N., Tian H., Liu Y., Wang D.Y., Chen Y.Q., Yang Y., Ren T.L.** Graphene-Paper Pressure Sensor for Detecting Human Motions. *ACS Nano* 11 (2017), 8790–8795. 10.1021/acsnano.7b02826
- [24] **Casula G., Lai S., Matino L., Santoro F., Bonfiglio A., Cosseddu P.** Printed, Low-Voltage, All-Organic Transistors and Complementary Circuits on Paper Substrate. *Advanced Electronic Materials* 6 (2020). 10.1002/aelm.201901027.
- [25] **Lee Y., Lee T.W.** Organic Synapses for Neuromorphic Electronics: From Brain-Inspired Computing to Sensorimotor Nervetronics. *Acc Chem Res* 52 (2019), 964–974. 10.1021/acs.accounts.8b00553
- [26] **Thiemann S., Sachnov S.J., Pettersson F., Bollström R., Österbacka R., Wasserscheid P., Zaumseil J.** Cellulose-Based Ionogels for Paper Electronics. *Advanced Functional Materials* 24 (2013), 625–634. 10.1002/adfm.201302026
- [27] **Torricelli F., Adrahtas D.Z., Bao Z., Berggren M., Biscarini F., Bonfiglio A., Bortolotti C.A., Frisbie C.D., Macchia E., Malliaras G.G., et al.** Electrolyte-gated transistors for enhanced performance bioelectronics. *Nat Rev Methods Primers* 1(2021). 10.1038/s43586-021-00065-8
- [28] **Xu M., Zhang X., Li S., Xu T., Xie W., Wang W.** Gate-controlled multi-bit nonvolatile ferroelectric organic transistor memory on paper substrates. *Journal of Materials Chemistry C* 7 (2019), 13477–13485. 10.1039/c9tc04356j
- [29] **Yang X., Yu J., Zhao J., Chen Y., Gao G., Wang Y., Sun Q., Wang Z.L.** Mechanoplastic Tribotronic Floating-Gate Neuromorphic Transistor. *Advanced Functional Materials* 30 (2019), 2002506. 10.1002/adfm.202002506
- [30] **Hayakawa R., Honma K., Nakaharai S., Kanai K., Wakayama Y.** Electrically Reconfigurable Organic Logic Gates: A Promising Perspective on a Dual-Gate Antiambipolar Transistor. *Advanced Materials* 34 (2022), 2109491. 10.1002/adma.202109491
- [31] **Sangwan V. K., Hersam M.C.** Neuromorphic nanoelectronic materials. *Nature Nanotechnology* 15 (2020), 517–528. 10.1038/s41565-020-0647-z

[32] Yu J., Yang X., Gao G., Xiong Y., Wang Y., Han J., Chen Y., Zhang H., Sun Q., Wang Z.L. Bioinspired mechano-photonic artificial synapse based on graphene/MoS₂ heterostructure. *Science Advances* 7 (2022), eabd9117. 10.1126/sciadv.abd9117

[33] Yu J., Gao G., Huang J., Yang X., Han J., Zhang H., Chen Y., Zhao C., Sun Q., Wang Z.L. Contact-electrification-activated artificial afferents at femtojoule energy. *Nature Communications* 12 (2021), 1581. 10.1038/s41467-021-21890-1

This article has been previously published. Citation link: Q. Sun, N. Xu, X. Pu, Z. L. Wang Paper-based electronics and Neuromorphic Paper Chips// 10 Breakthrough Ideas in Energy for the Next 10 Years: 4rd Annual Report of the Global Energy Association on development of international research and projects in the field of energy, 2023. PP. 3–10. The original full text of the report is available at the link: <https://globalenergyprize.org/en/2023/06/15/10-breakthrough-ideas-in-energy-for-the-next-10-years/>

Q. Sun, N. Xu, X. Pu, Z. L. Wang

Beijing Institute of Nanoenergy and Nanosystems,
Chinese Academy of Science, Changchun, China

PAPER-BASED ELECTRONICS AND NEUROMORPHIC PAPER CHIPS

Introduction. Modern electronics have stepped into a multiplex-developing era in which device scaling (or cost reduction) is not the only path followed by the semiconductor industry as in the last few decades. In particular, transistor-scaling approaching the 3 nm limit urgently requires revolutionary technology to transcend Moore’s law by improving cost/performance efficiency with novel nanomaterials or adding more functionality through integration. Emerging “More than Moore” toward diversity and versatility is leading another research direction to advance information technology through the rapid development of wearable smart devices and systems, artificial intelligence, biomimetic electronics, neuromorphic transistors, adaptive interactive interfaces, and self-powered systems [1, 2]. The More-than-Moore devices and intelligent systems, which incorporate power sources, power electronics, multifunctional sensors, and wireless transmitters, have become increasingly prominent with functional diversification in systematic integration and cost/performance advantages. Among the potential More-than-Moore devices and intelligent systems, paper electronics is an excellent candidate to multifunctional, adaptive, high-throughput, and low-cost integration.

Paper is by far the cheapest and most widely available flexible materials in daily life. The price of paper (≈ 0.1 cent dm^{-2}) is substantially lower than that of plastic substrates such as polyethylene terephthalate (PET, ≈ 2 cent dm^{-2}) and polyimide (PI, ≈ 30 cent dm^{-2}), besides the advantages of easy to degrade and recycle. The speed of the roll-to-roll (R2R) manufacturing process of paper sometimes exceeds 100 km h^{-1} . In addition, paper is also environmentally friendly since it is recyclable and made of renewable raw materials. As is known, paper is mainly used for packaging and for displaying and storing information in traditional industries. In recent years, paper electronics have attracted considerable attention due to the unique characteristics of conjugated paper substrates, including mechanical flexibility/foldability, sustainability, biodegradability, light weight, low cost, etc. It offers an excellent on-chip prototype with facile modular design and potential energy-autonomy characteristics, covering paper-based printed circuit boards, hybridized electronics/microfluidics, nano/microelectromechanical systems, and various energy harvesters. The energy efficiency of the paper electronics has also emerged as a significant task/target to go beyond the inconvenience and possible pollution problems of traditional power supply to constitute the anticipated energy-autonomous system (i.e., sustainable paper electronics).

Commonly, the sustainable operation of integrated paper electronics can be guaranteed by the basic components, including: 1) energy harvesters relying on triboelectric nanogenerators, piezoelectric transducers, thermoelectric devices, or photovoltaics; 2) energy storage devices with supercapacitors or batteries; and 3) low-power-consuming functional electronics and circuits (Fig. 1); [3] furthermore, sustainable paper electronics are possible to be pushed forward to develop energy-efficient neuromorphic paper

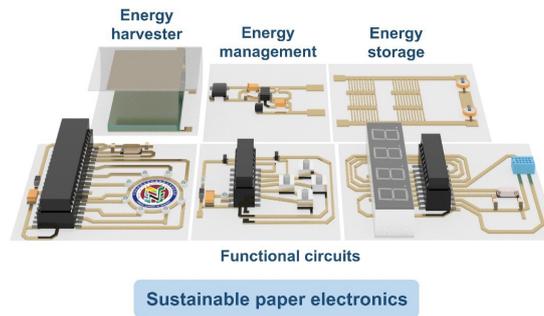


Fig. 1. Sustainable paper chip and modules comprising energy harvesting devices, energy storage devices, and functional circuits

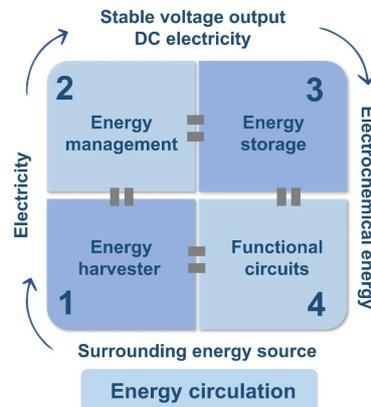


Fig. 2. The working process of sustainable paper electronics also implies an energy circulation of surrounding energy conversion, electrochemical energy storage, and energy utilization in functional circuits (in the form of photonic, thermal, electromagnetic, or mechanical energy)

chip by utilizing 4) cutting-edge neuromorphic components based on traditional paper-based transistors, memories, and logic gates toward potential in-memory computing applications. The working process of sustainable paper electronics also implies an energy circulation of surrounding energy conversion, electrochemical energy storage, and energy utilization in functional circuits (in the form of photonic, thermal, electromagnetic, or mechanical energy) (Fig. 2). Sustainable paper electronics present new paradigm for adaptive and energy-autonomy functional circuits to extend the broader path toward efficient, economical, and customized integrative electronics and complementary self-powered systems.

Advantages of paper materials

The growing interest in the use of paper in flexible electronics is due to the natural properties and unique/advantageous structural characteristics of paper (Fig. 3) [4–6]: 1) paper is a ubiquitously available and renewable material with low cost; 2) as it is biocompatible, biodegradable, and combustible, paper can be safely disposed of by incineration, saving space in e-waste disposal; 3) based on paper substrate, liquid substances can flow in defined channels via capillary action without relying on external forces; 4) the properties (e.g., hydrophilicity and permeability) of the paper matrix can be tailored to meet individual demands; 5) the 3D porous structure throughout the thickness of the paper with a high surface area allows functional reagents to be easily absorbed, and most importantly, two sides of the paper can be selectively treated with different or the same functions; 6) the main composite (cellulose) being not soluble



Fig. 3. The advantage of paper

in classical organic solvents endows paper with excellent chemical stability; and 7) paper consisting of only cellulose can exhibit higher dimensional stability over temperature and lower thermal expansion than most plastics, making it possible to be functionalized (or operated) at elevated temperatures.

Conductive manufacturing process for paper

Paper, with its porous structure, mainly made of randomly interconnected cellulose fibers, facilitates the immobilization of active materials and diffusion of aqueous solutions. During this process, the capillary action generated by the hydrophilicity and porosity of cellulose plays a significant role in the design and fabrication of electronic switches and micrototal analysis systems. Because electronic devices call for flexible substrates with good conductivity, it is essential to reform the inherent insulating feature of cellulose-rich paper and enhance its conductivity to satisfy demanded functional applications. To date, numerous manufacturing approaches, modification strategies, working principles, and applications have been developed. Surprisingly, even the simplest manufacturing processes can endow commercial paper with special functions for practical application at low cost. Several typical modification approaches are discussed as follows (Fig. 4).

1) Vacuum filtration: Vacuum filtration is a highly scalable, low-cost and easy process that has been widely used for making freestanding paper-like conductive films. The vacuum filtration setup usually consists of a Buchner funnel, filter membrane and vacuum system. Different kinds of filter membranes, such as anodic aluminum oxide filter membranes, poly(vinylidene fluoride) (PVDF) membranes, polytetrafluoroethylene (PTFE) membranes, and cellulose membranes, have been used in making conductive paper [7].

2) Pen-Writing: The pen-writing method can transfer and pattern conductive materials on the substrate via simple writing actions, which is especially suitable for the “on-demand” production of paper electronics. Using only ordinary office supplies, various electronic components can be designed and produced within a few minutes. Based on different drawing materials, the pen-writing method can be divided into “pencil drawing” and “do-it-yourself pen writing”. Commercial pencil fillers are made by mixing graphite and clay in a certain proportion. By drawing on paper with a pencil, graphite circuits and electrodes can be easily made in a fast and solvent-free manner. These graphitic tracks are mechanically robust, lightweight, environmentally friendly, and resistant to chemical corrosion, heat, and radiation. In recent years, different types of electronics, such as humidity sensors, pressure sensors, and nanogenerators, have been generated by pencil drawing on paper substrates. The resulting porous graphite paper fiber hybrid structures can work as passive conductive electrodes and active sensing materials. Their conductivity mainly depends on the graphite content, paper roughness, and drawing parameters [8].

3) Mayer-rod coating: Mayer-rod coating is a well-known coating technique widely used in the coating industry for making thin films in a continuous and controlled manner. A layer rod is a metal bar with

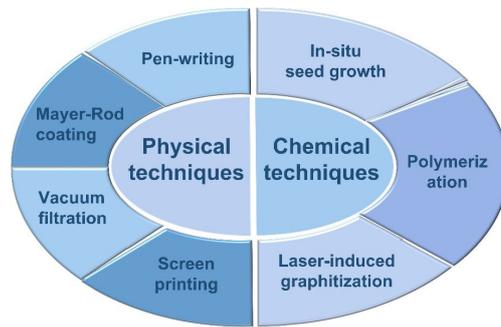


Fig. 4. Conductive manufacturing process for paper

a wire wrapped around that used to draw a solution over a substrate surface. The diameter of the wire wound around the bar determines the thickness of the conductive film. Applying this technique to the preparation of conductive paper allows the production of large-area conductive layers with tunable thickness [9].

4) Screen Printing: Screen printing is quite different from the other conventional printing techniques. A layer of ink is dragged across the surface of a screen and squeezed through the open pores of the patterned mesh onto the substrate. Screen printing is often used as a flat printing technique in batch processes but is also adaptable to an R2R process, rotary screen printing, which enables a rather high throughput. Using this technique for conductive processing on paper, conductive paths with a specific morphology can be obtained quickly and in large quantities [10].

5) In Situ Seed Growth: In situ seed growth is an effective way to both enhance the interactions and control the architectures of the generated products by simply focusing on the growth process. Typically, prior to the experiment, the metal seed solution is synthesized via a simple reduction reaction using NaBH_4 , trisodium citrate, hydroxylamine hydrochloride, or ascorbic acid as a reductant. Subsequently, the as-prepared seed solution is dropped into the hydrophilic region and equilibrated under ambient surroundings until the paper substrate is dry. After repeating this process several times, the substrates are rinsed thoroughly with water, and a freshly prepared aqueous growth solution is added. Finally, continuous and dense conducting paper electrodes with outstanding electrochemical performance are achieved after washing with water again [11].

6) Polymerization: Polymerization is an alternative to noble metal growth for applications in paper electronics. The rough and porous architecture allows cellulose paper to be easily modified with conjugated polymers through the formation of hydrogen bonds with added polymer monomers. The electrical conductivity of conducting polymers can be turned by “doping” via chemical or electrochemical redox reactions and protonation (otherwise known as dopants) while maintaining the inherent characteristics associated with traditional polymers, such as ease of synthesis and processing flexibility [12].

Laser direct writing (laser-induced graphitization): Laser direct writing is a simple and scalable all-solid-state approach that can convert carbon-based material into highly conductive graphene. The scribing laser simultaneously reduces and exfoliates carbon-based material to yield an open porous network of graphene. In addition, this method can also precisely control the shape of final products by designing different patterns, which has been widely used in making microscale energy storage devices [13].

In addition to the methods mentioned above, magnetron sputtering, photolithography, and printing methods are also available to prepare conductive layers with good performance on paper, which are the prerequisites to fabrication paper-based sustainable and functional electronics. Various processes allow the preparation of various conductive paths on paper, and combined with the inherent properties of paper, paper-based electronics are assisting and revolutionizing the field of flexible electronic devices, ranging from energy harvesting, energy storage and functional circuits. The following section will specifically describe various paper-based functional electronic devices.

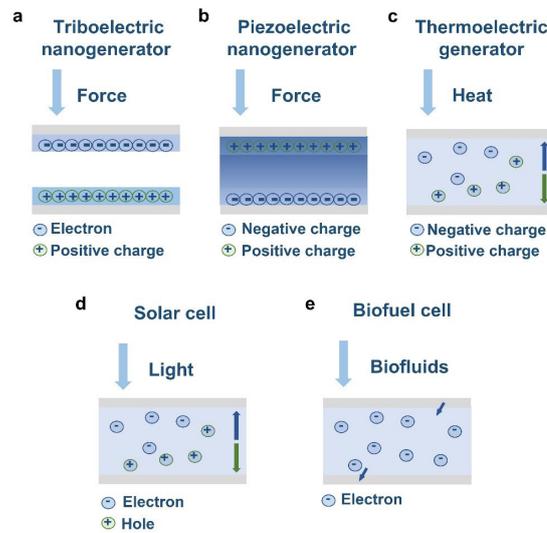


Fig. 5. The schematic diagram of paper-based energy harvester devices: a) Triboelectric nanogenerator (TENG); b) Piezoelectric nanogenerator (PENG); c) Thermoelectric generator (TEG); d) Solar cell; e) Biofuel cell

Diversity of flexible electronics based on paper matrices

Equipped with a variety of electronic components on common paper substrates, portable and sustainable electronic devices with unique features have been a compelling concept. The significant merits of cellulose allow for the design of a variety of dexterous electronic systems. In addition, all frequently used functions, such as power generation/supply, work progress, process display, result read-out, and even feedback, which are usually performed by different facilities, can be integrated into one paper platform. There is an emerging trend in developing new physical concepts for the utilization of paper to provide performance beyond imagination. Based on the operating principles and demanded functions, the successful implementation of sustainable paper electronics require the following functional devices: 1) energy harvesting devices (e.g., nanogenerators (NGs), energy harvesting cells), 2) energy storage devices (e.g., supercapacitor, battery), 3) functional circuits and sensors, and 4) information devices (e.g., transistor, memory, logic gate) for potential neuromorphic engineering/computing.

Paper-based energy harvesters

Paper-based energy harvesters can readily convert ambient energy (e.g., mechanical energy, heat, light, and biochemical energy) into electricity.

Triboelectric Nanogenerators (TENGs). TENGs, proposed by Wang's Group in 2012, are originated from Maxwell displacement current and can readily harvest mechanical energy based on the triboelectric effect by coupling contact electrification and electrostatic induction (Fig. 5a) [14]. Contact-separation between two materials causes charge transfer between the surfaces, and the charges or electrons flow through external circuits to maintain electrostatic equilibrium. Thus, TENG generates an alternating electrical output. Paper can be used as a substrate material or as a positive triboelectric layer material for TENGs, which can endow the device with excellent flexibility, outstanding stretchability, and versatility [15].

Piezoelectric Nanogenerators (PENGs). PENGs based on noncentrosymmetric piezoelectric materials functionalize relying on the direct piezoelectric effect due to a change in the electrical polarization induced by breaking the central symmetry of the crystal structure (Fig. 5b) [1, 16]. The stress-dependent change in polarization generates an internal potential difference across the material, which acts as the driving force for the flow of electrons in external circuits to generate an alternating current. The polarized charge density is determined by the piezoelectric coefficient of the materials and the applied stress. The choice of paper base as a substrate to prepare PENG devices can improve the flexibility and applicability of the devices [7].

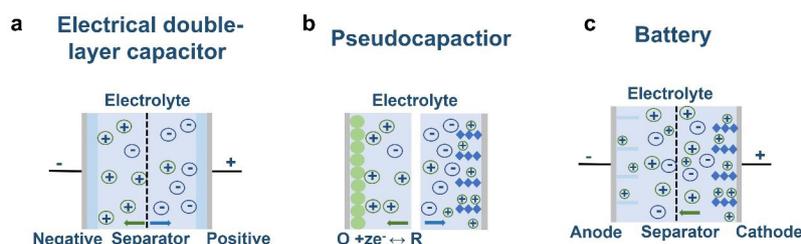


Fig. 6. The schematic diagram of paper-based energy storage devices: a) Electrical double-layer capacitor; b) Pseudocapacitor; c) Battery

Thermoelectric Generators (TEGs). TEGs convert heat energy into electrical energy through the Seebeck or Soret effect (Fig. 5c). The temperature gradient between two electrically connected conductors or semiconductors induces the diffusion of carriers or ions away from the hot side, leading to the development of a thermopotential and direct current in the external circuit. The use of paper as a substrate for thermoelectric generators can improve the tensile properties of paper-based thermoelectric generators depending on the structural design, and the thermal treatment of the paper alone needs to be considered [17].

Solar Cells. Solar cells convert light energy into electricity through photovoltaic effects (Fig. 5d). A typical solar cell contains active layers, carrier-selective layers and electrodes. Light is absorbed by the active layers, generating electron–hole pairs, or excitons, which are subsequently separated by the built-in potential and then collected by the electrodes through carrier-selective layers or transporting layers. When paper is chosen as the substrate for solar cells, the porous characteristics of paper can bind well with the active layer material, and the paper-based solar cell can perform well [18].

Biofuel Cells (BFCs). The emerging technology of BFCs has recently received significant interest, which can readily convert the chemical energy of biodegradable organic matters into electrical power. Instead of the expensive metal catalysts used in electrochemical batteries, the bioredox reactions in BFCs are catalyzed by renewable enzymes or microorganisms, providing a clean energy alternative to energy harvesting cells (Fig. 5e). In the biofuel cell, the oxidizing biocatalyst promotes an oxidation reaction at the bioanode and a reduction reaction at the biocathode, which causes the electrons to flow in the external circuit and generates an electric output. The output current mainly depends on the concentration of the chemical fuel in the biofluids and the efficiency of electron transfer between the biocatalyst and the electrode. As the porous structure of paper can readily provide good reaction channels, paper-based applications in biofuel cells are gaining increasing attention [19].

Paper-based energy storage devices

Supercapacitors (SCs). SCs store electrical charges through the reversible electrostatic adsorption of electrolyte ions or faradic surface redox reactions. A flexible supercapacitor consists of two electrodes with current collectors, an electrolyte and a separator. Electrical-double-layer capacitors work through reversible electrostatic ion adsorption at the surface or porous structure of high-surface-area carbon materials without any chemical reaction (Fig. 6a). Pseudocapacitors store energy through surface redox reactions at transition-metal oxide, carbide, nitride, or conducting polymer electrodes (Fig. 6b). Paper can be used as the substrate for supercapacitors, which can bind carbon materials or other reactants very well due to its porous nature. Paper can also be used as a separator for supercapacitors to selectively pass substances after certain treatments, which makes paper-based supercapacitors very attractive in recent years [20].

Batteries. Rechargeable batteries, or secondary batteries, store energy through reversible electrochemical redox reactions in electrodes under an applied voltage and current (Fig. 6c). As chemical reactions occur in the bulk of the electrode materials, batteries can deliver very high energy densities. Enlarging the chemical potential difference between the anode and the cathode, using nanomaterials and engaging a stable electrolyte with high voltage tolerance are effective strategies to increase the energy storage ability of

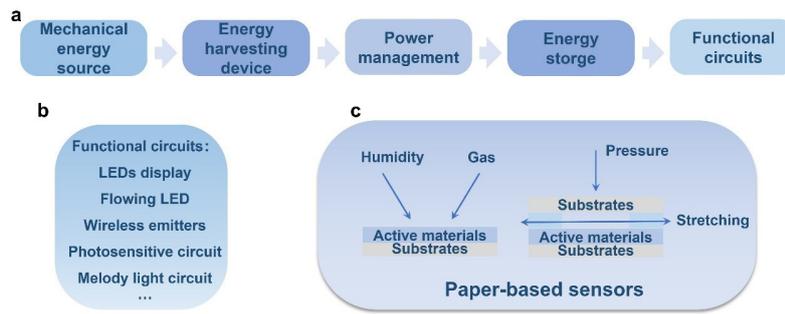


Fig. 7. The schematic diagram of paper devices—functional circuits and sensors:
 a) Working process for sustainable paper electronics; b) Functional circuits; c) Paper-based sensors

a battery. Similar with paper-based supercapacitors, paper can also be used as the substrate or separator for batteries, allowing paper-based batteries with good flexibility [21].

Paper-based functional devices and circuits

Energy-efficient intelligent systems incorporating modern electronics, circuits, and power sources have rapidly become inseparable for a wide range of applications. Electronics based on paper are well positioned within the more general trend toward green industry, which will provide a smart solution for clients living in the emerging artificial intelligence-driven Big Data era. In fact, electronic or optoelectronic components built on ubiquitously available, lightweight, and biodegradable paper or paper-like substrates enable ingratiated applications. An energy autonomous paper module has been proposed by comprising an energy harvester, power management circuits, energy storage units, and back-end functional circuits [3], which demonstrates a prototype for sustainable electronic devices and systems (Fig. 7a).

Electrodes and functional circuits. In contrast to conventional electronics, reliable flexible electrodes and circuits are urgent and highly desirable for paper electronic devices to replace metallic elements (e.g., Al, Ti, Cu, and alloy foils) and certain plastics used previously. In this manner, the obvious drawbacks of traditional substrates, including larger mass densities, easy oxidation, and poor affinity between the active materials and plastic matrix, can be effectively alleviated. Due to the intrinsic insulating feature of cellulose fibers, prior to constructing electronic devices, coating conductive layers, or adding conducting fillers to their surface is required to make the substrates electrically conductive. The typical electrically conducting materials employed in preparing paper components can be divided into five categories, noble metals, metal oxides, conjugated polymers, ionic liquids, and carbon-based materials. A functional circuit is a general term for various electronic circuits, commonly used to construct conductive paths on paper using the conductive processing mentioned above, which can be very good for signal transmission between various basic electronic components (Fig. 7b). Lighting a single LED or multiple LEDs on paper substrate demonstrates the simplest paper-based functional circuits by building a conductive circuit. Complex functional circuits can be implemented by integrating multiple electronic components on paper to demonstrate more complex functions, such as flowing LEDs, wireless emitters, photosensitive circuits, melody light circuits, etc. [3] For the energy-efficiency of paper-based energy harvesters directly powering (or charging) paper electronic devices, paired power management circuit on paper is also critical for achieving sustainable paper-based electronics.

Diversified sensors. There are various types of sensors, which are able to reversibly or irreversibly detect some kind of stimulus (e.g., humidity, gas, pressure/strain) in their simplest form. The most important properties of a sensor are the specificity, sensitivity, cross-sensitivity, and stability. The use of impregnated paper (universal indicator paper) for measuring pH has been well-established for a long time. Today, paper is also considered as a potential substrate for medical sensing purposes in microfluidic devices (“paperfluidics” and “lab on paper”) for diagnostics and other kinds of bioactive sensing. If electronic functionality

can be added to such paper-based sensors, it is clear that extensive development could be made to achieve “smarter” paper-based sensors capable of measuring multiple analytes at a high sensitivity.

Paper-based humidity sensors. In the humidity sensor, paper acts not only as the active sensing material but also as a substrate. Cellulose paper is hygroscopic in nature. When the paper comes in contact with a humid environment, water molecules adsorb on its surface by making loose bonds with the hydroxyl groups. As a result, the effective dielectric constant increases. The change in dielectric constant is much greater in paper than in air due to concentrated adsorption of water molecules on the paper surface. Thus, the overall capacitance of the sensor changes in response to the varied humidity [8].

Paper-based gas sensors. Paper-based gas sensors are intriguing and promising although the research is still in its infancy. Because paper is low-cost, insulating, flexible, and portable, it has been recognized as a particular class of supporting matrix for accommodating humidity sensing materials. There are still several amendments that may improve the humidity sensing performance from the following aspects: 1) Sensing materials are always formulated on paper surfaces, which may impair the mechanical stability of paper substrate and the continuity of the active sensing network. 2) Enlargement of the sensing area amplifies gas adsorption capacity while the resistance is also changed, which may impact the sensitivity. 3) Dispersible active ink is conventionally prepared by binding chemical agents on paper surface, which may hamper the gas molecules in close contact with the active sensing layer. Besides, further development on paper-based gas sensor should also be considered from the main sensing parameters, e.g., response, sensitivity, response/recovery times, selectivity, detection limit, and stability [22].

Paper-based pressure/strain sensors. Recently, pressure sensors for application in wearable devices and electronic skins have fascinated many researchers due to their unique properties. A significant objective within this theme is the generation of pressure/strain sensors featuring both high sensitivity and large working range (Fig. 7c). The construction of paper-based pressure/strain sensors is simple, cost effective, and scalable and does not require complex equipment. With such devices, dynamic forces over a wide pressure/strain range can be detected and various complex forces (e.g., pressing, torsion, and bending) can be resolved. These attributes enabled the real-time and in situ monitoring the real-world force responses from respiration, wrist pulses, and even acoustic vibrations. The incorporation of paper in pressure/strain sensors is expected to provide a promising route for facile integration with smart wearable electronics in the future (e.g., flexible touch displays, human-machine interfacing devices, and even prosthetic skins) [23].

Paper-based organic semiconductor devices for cutting-edge neuromorphic engineering/computing

The idea to “print” electronics on flexible paper and plastic substrates is not new. Until now, printed flexible electronics has taken the first steps from the research laboratories into commercialization. The development during the last decades of electronic and optoelectronic applications, based on solution-processable π -conjugated organic molecules and polymers, has renewed the interest in electronics manufactured on low-cost flexible plastic and paper substrates. Although it is truly challenging to fabricate electronic devices such as organic diodes or transistors that usually require molecularly smooth interfaces directly onto paper substrates, there have recently been promising reports of electronic devices fabricated directly onto paper substrates, and for some applications the rough and porous paper surface is even advantageous. By using R2R mass printing throughout the manufacturing process and inexpensive electronic materials, low-cost paper electronics could make their way into everyday life.

Transistors

Organic field effect transistors. With tremendous development of organic materials, OFETs have attracted considerable interest in organic electronics due to their characteristics of being lightweight, highly flexible, and easy to fabricate with low cost (Fig. 8a). Although significant advances have been achieved in the OFETs, the inherent disadvantage of relatively larger channels and the intrinsically low carrier mobility of organic semiconductors make it difficult to meet the application requirements of high operating frequency and high output current under low operating voltage. In order to take advantage of the low cost of paper substrates, the key materials (especially the organic semiconductors) for

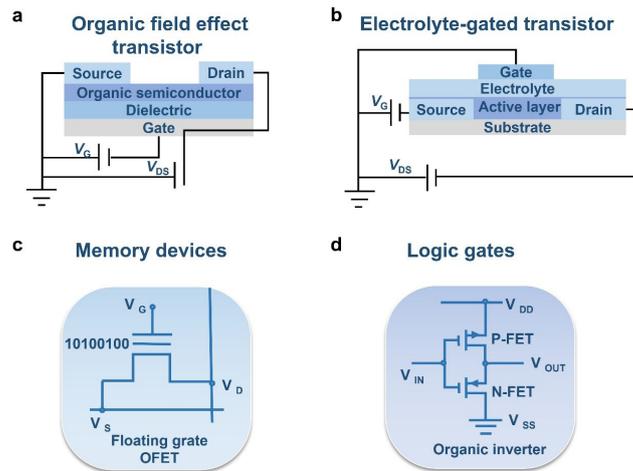


Fig. 8. The schematic diagram of paper devices—information devices: a) Organic field effect transistor (OFET); b) Organic electrolyte-gated transistor (OEGT); c) Organic light emitting diode (OLED); d) Memory devices; e) Logic gates

OFETs highly recommended to be printed. By adopting thick hybrid dielectric ($>2 \mu\text{m}$) with a high dielectric constant or applying smoothing barrier layers, OFETs can be readily evaporated and spin-coated on commercial photopaper and cotton-fiber paper substrates with a resulting RMS roughness of around 10 nm. Paper has also been directly used as the gate dielectric to allow low-voltage operating of OFET, enabling a new generation of low-cost and disposable analog and digital electronic circuits [24].

More recently, organic synapses are considered as promising components of neuromorphic electronic devices, including artificial brains and electronic sensorimotor nerves.[25] Organic materials have many advantages such as applicability for both solution-printing and micropatterning (or nanolithography) processes, biocompatible, mechanical properties that are desirable for future wearable and biocompatible electronics and robotics, and easy tuning of molecular properties. Paper-based organic synaptic devices retain simple device configuration and small energy consumption that is comparable to that of a biological synapse ($\sim 1\text{--}10 \text{ fJ/synaptic event}$). These are advantageous traits compared to neurons based on silicon circuitry, in which synapses are composed of several transistors and capacitors with complicated circuit configuration that consume relatively large amounts of energy. Sustainable paper-based organic synaptic devices are more impressive to conduct neuromorphic computing in a low-cost and energy-efficient fashion.

Organic electrolyte-gated transistors (OEGTs) – OEGT offers an effective way to addressing the surface roughness issues of paper electronics by incorporating mobile ions in the device structure. OEGTs are less sensitive to the surface roughness due to the homogeneous potential close to the dielectric/semiconductor interface, which is formed by the electric double layers (Fig. 8b). Besides, ion-conductive and electron-insulating electrolytes based on cellulose paper, introducing cellulose ionic gels with various salt ionic liquids, exhibit attractive properties such as transparency, flexibility, metastability, and high capacitance. This opens the way for the use of paper as a gate electrolyte for OEGTs in the field of flexible electronics. [26] Notably, OEGTs, capable of transducing biological and biochemical inputs into amplified electronic signals and stably operating in aqueous environments, have recently emerged as fundamental building blocks in bioelectronics and neuromorphic devices [27].

Organic memory devices (Fig. 8c). With the incorporation of tailorable organic electronic materials as channel and storage materials, OFET-based memory has become one of the most promising data storage technologies for hosting a variety of emerging memory applications, such as sensory memory, storage memory, and neuromorphic computing. The Von Neumann bottleneck is a natural result of using a bus to transfer data between the memory subsystems. The data communication between different levels of

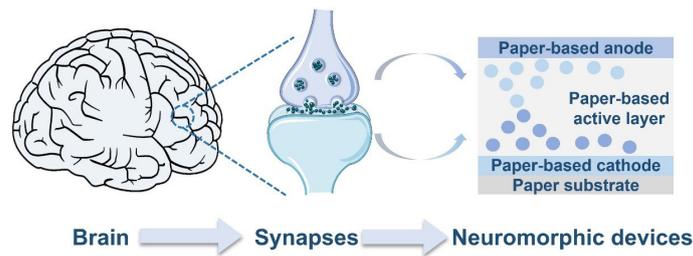


Fig. 9. Sustainable paper electronics for cutting-edge neuromorphic engineering/computing

memory hierarchy tends to involve significant delays and power consumption in the face of unstructured data analysis, large image processing, and other areas of artificial intelligence. In this regard, emerging nonvolatile memory technologies that allow parallel computing are highly desired. Inspired by the human brain, employing nonvolatile memory as artificial synapse for the implementation of neural systems has become very attractive as a potential possibility for future neuromorphic computing [28]. In addition, OFET-based memory can be prepared on paper to modulate multilevel nonvolatile drain-source current states using distributed domain polarization of the ferroelectric layer on the semiconductor channel [29]. Paper-based organic memory device not only has many advantages, such as low cost, biodegradability and renewability, but is also expected to be used as a disposable diagnostic biosensor for storing personal health conditions in daily life and providing good privacy protection by offering easy physical destruction in the Internet of Everything technology.

Organic logic gate devices. OFETs can be used as matrix-controlling elements in displays and as logic gates in digital electronic circuits. An organic logic inverter can be made by simply connecting an organic transistor with a resistor or a transistor (load). If the inverter has a gain ($dV_{OUT}/dV_{IN} > 1$), it can be used as an amplifier or as a building block for more complicated circuits, such as ring oscillators, flip-flops, shift registers, row decoders, code generators, and transponder circuits. A ring oscillator is obtained by connecting the input to the output of an odd number of inverters. Low power consumption and high yield is typically achieved by using complementary circuits, i.e., combining p- and n-channel OFETs (Fig. 8d). Electrically reconfigurable organic logic circuits are also promising candidates for realizing new computation architectures, such as artificial intelligence and neuromorphic devices [30].

Prospects of paper-based neuromorphic chips with integrated sensory, storage and computation

State-of-the-art computing systems, including artificial intelligence systems and neuromorphic computers, are highly required for the forthcoming Internet of Things society due to the growing demand for high-throughput data processing and low power consumption. Paper-based organic integrated circuits hold promise for such cutting-edge neuromorphic engineering/computing (Fig. 9) [31–33]. This is because their unique features (mechanical flexibility, light weight, and low-cost production) offer new device architectures (e.g., printable and wearable brain-like logic circuits) that cannot be obtained by the current Si-based electronics. However, paper-based organic devices suffer from difficulties regarding how to minimize the use of electronic components due to their incompatibility with conventional lithography techniques. Therefore, logic circuits still have low integration density and poor data processing capability. Two possible solutions are proposed as follows.

1) Reconfigurable logic circuits, as represented by field-programmable gate arrays, have the potential to provide a paradigm shift from the von Neumann type computer architecture. The reason is that reconfigurability, which is the most attractive characteristic in these devices, is expected to enable parallel and high-speed data processing, low power consumption, and the large-scale integration of electronic components by taking advantage of the diverse and flexible circuit designs in individual hardware levels. These are the required features for the upcoming “big data era”.

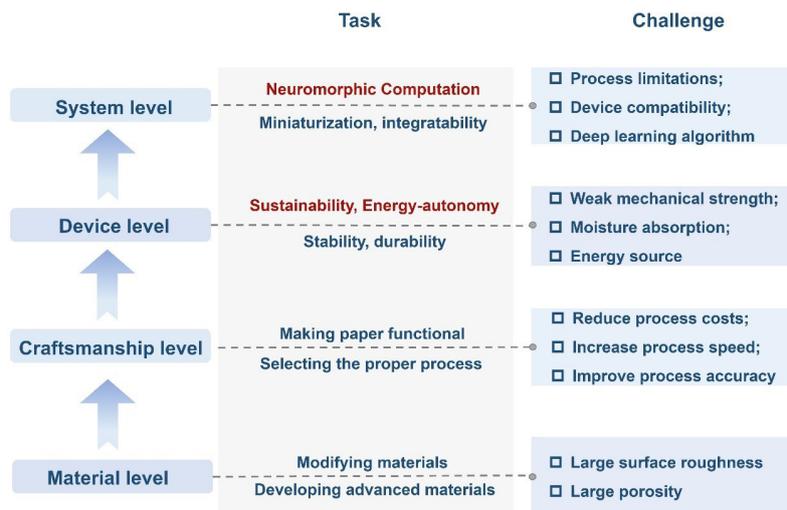


Fig. 10. Concluding remarks for sustainable paper electronics

2) In-memory computing is also resurfacing as an alternative to the von Neumann architecture. First proposed in the 1960s, in-memory computing can have a simple structure and faster calculation speed without the need to move data outside the fabric. However, it has not received enough attention, probably because of the satisfying improvement in computing capability fueled by the rapid development of transistors in the past few decades. Emerging sustainable paper electronics, especially integrated paper-based sensors, transistors, and memory, have great potential to be embodied with the in-memory computing concept, offering an attractive solution to the energy consumption and function integration.

The forthcoming innovations driven by flexible/stretchable/wearable electronics, together with the supporting Big Data industry and the Internet of Things (IoT), have inspired the relentless pursuit of advanced electronic devices (e.g., energy harvesters, energy-storage devices, functional circuits, information devices) with a variety of aesthetics, which can lead to drastic changes in our daily lives. The development of lightweight and flexible basic electronic components, together with the ongoing pursuit of high-performance flexible displays and memory chips, is necessary to accelerate the advent of the electronics era. Therefore, highlighting the emerging diversified electronic units on paper will pave the way for the growth of green electronics. Sustainable paper electronics and neuromorphic paper chip, comprising energy-harvester, energy storage, and multifunction, possess great potential for energy-efficient artificial sensory memory and neuromorphic computing in future artificial intelligence, providing promising alternatives to overcome conventional von Neumann bottleneck.

Concluding remarks and perspectives

Sustainable paper electronics offer great opportunities for producing low-cost, low-power-consuming, and functional electronic devices ranging from basic electronic components to integrated platforms. Though this technology presents obvious merits, the exploration of more portable and self-powered paper electronics is still a nascent field of research, and some significant challenges and hurdles remain (Fig. 10).

1. *Porous structure.* The point to emphasize here is that the intrinsic surface porous structure of paper will influence the resolution of the produced electronic device because the resolution of the conductive tracks is controlled by the paper properties and the method used to fabricate hydrophobic channels in the paper.

2. *Advanced materials.* Advanced materials have a large effect on the physical characteristics, structural accuracy, resolution, and functionality, which need to be revolutionized to enhance the properties and explore new functions for sustainability of paper electronics.

3. *Stability, durability, and sustainability.* The mechanical strength of the paper is weaker than that of traditional substrates (metals, glasses, and plastics), great progress is highly demanded to improve the stability, durability, and sustainability through papermaking technology and function integration.

4. *Humidity influence.* The humidity issue can be overcome by encapsulation or lamination of the active components on the paper substrate by protective materials (aluminum foil, insulating paint, plastic films, etc.) to obtain satisfactory properties.

5. *Optimized technologies.* Although various approaches have been reported to manufacture electronic devices on paper, cost-effective, easy-to-operate fabrication and integration techniques are still in urgent demand to be developed and optimized toward the functionality and sustainability of paper electronics.

6. *Miniaturized integrability.* Good design and construction of miniaturized, fully integrated, portable, and self-powered paper electronics are eagerly required. In particular, wireless energy-harvesting and signal output concepts should also be studied to make paper electronics fully energy-autonomous, and overcome the dependence on redundant wires.

Research on sustainable paper electronics is still in the early stages for commercialization. Significant research efforts regarding this technique are still needed for transforming lab-scale devices into commercial products. Further progress is required in the selection and functional treatment of the paper substrate, in micromanufacturing techniques, and in encapsulation strategies to realize the feasibility of sustainable paper electronics. Researchers are also firmly encouraged to spare no efforts in completing knowledge of currently observed constructs of paper material and introducing functional nanostructures in papermaking process. Besides, understanding the raw materials (e.g., cellulose, lignose, chitosan) in more depth over geometric structure and chemical constitution, rather than simply employing commercial porous paper as a functional carrier, may be the key for a successful transfer of paper electronics into commercial applications. To sum up, a new era of green electronics will come and, more convenience and benefit will be brought into our lives when all the upgrades and progress done and dusted, the sustainable paper electronics are employed for practical applications and are no longer the main theme of research development.

REFERENCES

- [1] **Z.L. Wang, J. Song**, Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays. *Science*, 312 (2006) 242–246. 10.1126/science.1124005
- [2] **C. Wu, A.C. Wang, W. Ding, H. Guo, Z.L. Wang**, Triboelectric Nanogenerator: A Foundation of the Energy for the New Era. *Advanced Energy Materials* 9 (2019), 1802906. 10.1002/aenm.201802906
- [3] **J. Han, N. Xu, J. Yu, Y. Wang, Y. Xiong, Y. Wei, Z.L. Wang, Q. Sun**, Energy autonomous paper modules and functional circuits. *Energy & Environmental Science*. (2022). 10.1039/d2ee02557d
- [4] **Y. Zhang, T. Zhang, Z. Huang, J. Yang**, A New Class of Electronic Devices Based on Flexible Porous Substrates. *Adv Sci*. 9 (2022), e2105084. 10.1002/advs.202105084
- [5] **Y. Zhang, L. Zhang, K. Cui, S. Ge, X. Cheng, M. Yan, J. Yu, H. Liu**, Flexible Electronics Based on Micro/Nanostructured Paper. *Adv Mater* 30 (2018), e1801588. 10.1002/adma.201801588
- [6] **D. Tobjork, R. Osterbacka**, Paper electronics. *Adv Mater* 23 (2011), 1935–1961. 10.1002/adma.2010-04692
- [7] **G. Zhang, Q. Liao, Z. Zhang, Q. Liang, Y. Zhao, X. Zheng, Y. Zhang**, Novel Piezoelectric Paper-Based Flexible Nanogenerators Composed of BaTiO₃ Nanoparticles and Bacterial Cellulose. *Adv Sci* 3 (2016), 1500257. 10.1002/advs.201500257
- [8] **H. Zhao, T. Zhang, R. Qi, J. Dai, S. Liu, T. Fei**, Drawn on Paper: A Reproducible Humidity Sensitive Device by Handwriting. *ACS Appl Mater Interfaces* 9 (2017), 28002–28009. 10.1021/acsami.7b05181
- [9] **J. Wang, M. Liang, Y. Fang, T. Qiu, J. Zhang, L. Zhi**, Rod-coating: towards large-area fabrication of uniform reduced graphene oxide films for flexible touch screens. *Adv Mater* 24 (2012), 2874–2878. 10.1002/adma.201200055

- [10] C.H. Lin, D.S. Tsai, T.C. Wei, D.H. Lien, J.J. Ke, C.H. Su, J.Y. Sun, Y.C. Liao, J.H. He, Highly Deformable Origami Paper Photodetector Arrays. *ACS Nano* 11 (2017), 10230–10235. 10.1021/acsnano.7b04804
- [11] K. Qi, J. He, H. Wang, Y. Zhou, X. You, N. Nan, W. Shao, L. Wang, B. Ding, S. Cui, A Highly Stretchable Nanofiber-Based Electronic Skin with Pressure-, Strain-, and Flexion-Sensitive Properties for Health and Motion Monitoring. *ACS Appl Mater Interfaces* 9 (2017), 42951–42960. 10.1021/acsnano.7b07935
- [12] L. Yuan, B. Yao, B. Hu, K. Huo, W. Chen, J. Zhou, Polypyrrole-coated paper for flexible solid-state energy storage. *Energy & Environmental Science* 6 (2013). 10.1039/c2ee23977a
- [13] H. Park, M. Kim, B.G. Kim, Y.H. Kim, Electronic Functionality Encoded Laser-Induced Graphene for Paper Electronics. *ACS Applied Nano Materials* 3 (2020), 6899–6904. 10.1021/acsnano.0c01255
- [14] F.-R. Fan, Z.-Q. Tian, Z.L. Wang, Flexible triboelectric generator. *Nano Energy* 1 (2012), 328–334. 10.1016/j.nanoen.2012.01.004
- [15] Q. Zhong, J. Zhong, B. Hu, Q. Hu, J. Zhou, Z.L. Wang, A paper-based nanogenerator as a power source and active sensor. *Energy & Environmental Science* 6 (2013), 1779–1784. 10.1039/C3EE40592C
- [16] Y. Chen, G. Gao, J. Zhao, H. Zhang, J. Yu, X. Yang, Q. Zhang, W. Zhang, S. Xu, J. Sun, Y. Meng, Q. Sun, Piezotronic Graphene Artificial Sensory Synapse. *Advanced Functional Materials* 29 (2019), 1900959. 10.1002/adfm.201900959
- [17] J.P. Rojas, D. Conchouso, A. Arevalo, D. Singh, I.G. Foulds, M.M. Hussain, Paper-based origami flexible and foldable thermoelectric nanogenerator. *Nano Energy* 31 (2017), 296–301. 10.1016/j.nanoen.2016.11.012
- [18] C.-P. Lee, K.-Y. Lai, C.-A. Lin, C.-T. Li, K.-C. Ho, C.-I. Wu, S.-P. Lau, J.-H. He, A paper-based electrode using a graphene dot/PEDOT:PSS composite for flexible solar cells. *Nano Energy* 36 (2017), 260–267. 10.1016/j.nanoen.2017.04.044
- [19] J.P. Esquivel, F.J. Del Campo, J.L. Gómez de la Fuente, S. Rojas, N. Sabaté, Microfluidic fuel cells on paper: meeting the power needs of next generation lateral flow devices. *Energy Environ. Sci.* 7 (2014), 1744–1749. 10.1039/c3ee44044c
- [20] D.V. Lam, U.N.T. Nguyen, E. Roh, W. Choi, J.H. Kim, H. Kim, S.M. Lee, Graphitic Carbon with MnO/Mn₇C₃ Prepared by Laser-Scribing of MOF for Versatile Supercapacitor Electrodes. *Small* 17 (2021), e2100670. 10.1002/smll.202100670
- [21] C.J. Zhang, S.H. Park, O. Ronan, A. Harvey, A. Seral-Ascaso, Z. Lin, N. McEvoy, C.S. Boland, N.C. Berner, G.S. Duesberg, et al., Enabling Flexible Heterostructures for Li-Ion Battery Anodes Based on Nanotube and Liquid-Phase Exfoliated 2D Gallium Chalcogenide Nanosheet Colloidal Solutions. *Small* 13 (2017). 10.1002/smll.201701677
- [22] J. Wang, X. Zhang, X. Huang, S. Wang, Q. Qian, W. Du, Y. Wang, Forced assembly of water-dispersible carbon nanotubes trapped in paper for cheap gas sensors. *Small* 9 (2013), 3759–3764. 10.1002/smll.201300655
- [23] L.Q. Tao, K.N. Zhang, H. Tian, Y. Liu, D.Y. Wang, Y.Q. Chen, Y. Yang, T.L. Ren, Graphene-Paper Pressure Sensor for Detecting Human Motions. *ACS Nano* 11 (2017), 8790–8795. 10.1021/acsnano.7b02826
- [24] G. Casula, S. Lai, L. Matino, F. Santoro, A. Bonfiglio, P. Cosseddu, Printed, Low-Voltage, All-Organic Transistors and Complementary Circuits on Paper Substrate. *Advanced Electronic Materials* 6 (2020). 10.1002/aelm.201901027
- [25] Y. Lee, T.W. Lee, Organic Synapses for Neuromorphic Electronics: From Brain-Inspired Computing to Sensorimotor Nervetronics. *Acc Chem Res* 52 (2019), 964–974. 10.1021/acs.accounts.8b00553
- [26] S. Thiemann, S.J. Sachnov, F. Pettersson, R. Bollström, R. Österbacka, P. Wasserscheid, J. Zausseil, Cellulose-Based Ionogels for Paper Electronics. *Advanced Functional Materials* 24 (2013), 625–634. 10.1002/adfm.201302026
- [27] F. Torricelli, D.Z. Adrahtas, Z. Bao, M. Berggren, F. Biscarini, A. Bonfiglio, C.A. Bortolotti, C.D. Frisbie, E. Macchia, G.G. Malliaras, et al., Electrolyte-gated transistors for enhanced performance bioelectronics. *Nat Rev Methods Primers* 1 (2021). 10.1038/s43586-021-00065-8

- [28] **M. Xu, X. Zhang, S. Li, T. Xu, W. Xie, W. Wang**, Gate-controlled multi-bit nonvolatile ferroelectric organic transistor memory on paper substrates. *Journal of Materials Chemistry C* 7 (2019), 13477–13485. 10.1039/c9tc04356j
- [29] **X. Yang, J. Yu, J. Zhao, Y. Chen, G. Gao, Y. Wang, Q. Sun, Z.L. Wang**, Mechanoplastic Tribotronic Floating-Gate Neuromorphic Transistor. *Advanced Functional Materials* 30 (2019), 2002506. 10.1002/adfm.202002506
- [30] **R. Hayakawa, K. Honma, S. Nakaharai, K. Kanai, Y. Wakayama**, Electrically Reconfigurable Organic Logic Gates: A Promising Perspective on a Dual-Gate Antiambipolar Transistor. *Advanced Materials* 34 (2022), 2109491. 10.1002/adma.202109491
- [31] **V.K. Sangwan, M.C. Hersam**, Neuromorphic nanoelectronic materials. *Nature Nanotechnology* 15 (2020), 517–528. 10.1038/s41565-020-0647-z
- [32] **J. Yu, X. Yang, G. Gao, Y. Xiong, Y. Wang, J. Han, Y. Chen, H. Zhang, Q. Sun, Z.L. Wang**, Bioinspired mechano-photonic artificial synapse based on graphene/MoS₂ heterostructure. *Science Advances* 7 (2022), eabd9117. 10.1126/sciadv.abd9117
- [33] **J. Yu, G. Gao, J. Huang, X. Yang, J. Han, H. Zhang, Y. Chen, C. Zhao, Q. Sun, Z.L. Wang**, Contact-electrification-activated artificial afferents at femtojoule energy. *Nature Communications* 12 (2021), 1581. 10.1038/s41467-021-21890-1

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.313.322-81

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30101>



Т.Н. Карташова¹, А.Ю. Прокофьев¹, А.Г. Филин² ✉

¹ ПАО "Силовые машины", Санкт-Петербург, Россия;

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

✉ a.g.filin@gmail.com

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к проектированию системы вентиляции современных высоконагруженных турбогенераторов и основные тенденции развития. Выполнен обзор актуальных технических решений, применяемых мировыми производителями-лидерами отрасли, а также рассмотрены современные высокоэффективные решения, применяемые в системах вентиляции турбогенераторов производства завода «Электросила» АО «Силовые машины». Рассмотрены основные особенности современных схем вентиляции, применяемых в турбогенераторах с воздушным охлаждением, и наиболее эффективные способы повышения интенсивности охлаждения сердечника и обмотки статора с косвенным охлаждением, обеспечивающие снижение температуры активных частей при сохранении расхода охлаждающего воздуха и затрат мощности на охлаждение активных частей. Предложены конструктивные решения, позволяющие минимизировать вентиляционные потери и затраты мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха в роторе. Подтверждено при помощи численного эксперимента, а также модельными испытаниями, что за счёт рационального проектирования «улитки» центробежного вентилятора турбогенератора и оптимального выбора начальной закрутки потока на входе в ротор механические потери на вентиляцию турбогенератора могут быть существенно снижены при сохранении исходного теплового состояния статора и ротора. Результатами аэродинамических расчетов и экспериментально подтверждено, что в турбогенераторах большой мощности с воздушным охлаждением обмотки ротора целесообразно использовать вращающийся направляющий аппарат в сочетании с неподвижным направляющим аппаратом, причём наилучший эффект достигается при использовании вращающегося направляющего аппарата в форме осевого вентилятора.

Ключевые слова: схема вентиляции, эффективность охлаждения, вентиляционные каналы, турбогенератор, коэффициент полезного действия, направляющий аппарат.

Для цитирования:

Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю., Филин А.Г. Современные подходы к разработке системы охлаждения турбогенераторов с воздушным охлаждением // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 38–54. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30101>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30101>*T.N. Kartashova¹, A.Yu. Prokofev¹, A.G. Filin² ✉*¹ PJSC "Power Machines", St. Petersburg, Russia;² Joint Stock Company "Power machines – ZTL, LMZ, Electrosila, Energomachexport",
St. Petersburg, Russia✉ a.g.filin@gmail.com

MODERN APPROACHES TO COOLING SYSTEM DESIGN FOR AIR-COOLED TURBOGENERATORS

Abstract. The article discusses modern approaches to the design of the ventilation path of modern high-capacity turbine generators and the main development trends. We present an overview of current technical solutions used by world manufacturing industry leaders, as well as modern high-performance solutions used in ventilation systems of turbine generators manufactured by the Electrosila plant of JSC Power Machines. We consider the main features of modern ventilation schemes used in air-cooled turbine generators and the most effective ways to increase the cooling intensity of the core and stator winding with indirect cooling, which ensures a decrease in the temperature of the active parts while maintaining the cooling air consumption and power consumption for cooling the active parts. Design solutions are proposed to minimize ventilation losses and power costs for cooling air circulation in the rotor. It is confirmed by a numerical experiment, as well as model tests, that due to the rational design of the volute housing of the turbine generator centrifugal fan and the optimal choice of the initial flow twist at the rotor inlet, mechanical losses on turbine generator ventilation can be significantly reduced while maintaining the initial thermal state of the stator and rotor. The results of aerodynamic calculations and experiments confirmed that in high-power turbine generators with air-cooled rotor windings, it is advisable to use a rotating guide vane in combination with a stationary guide vane; the best effect is achieved when using a rotating guide vane in the form of an axial fan.

Keywords: ventilation path, cooling efficiency, ventilation ducts, turbine generator, efficiency, guide vane.

Citation:

T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofev, A.G. Filin, Modern approaches to cooling system design for air-cooled turbogenerators, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 38–54, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30101>

Введение. Борьба за потребителя, высокая конкуренция на рынке энергетического оборудования, обязательные требования к обеспечению необходимого уровня эффективности и надёжности оборудования привели к тому, что на сегодняшний день все турбогенераторы большой мощности, выпускаемые мировыми производителями-лидерами отрасли, представляют собой высоко нагруженные машины практически по всем воздействиям: электромагнитному, механическому, тепловому. Уход от мирового тренда, движение в сторону снижения удельных нагрузок неизбежно сделают выпускаемую продукцию неконкурентоспособной на фоне доступных мировых аналогов. Это неизбежно заставляет ведущих производителей оборудования постоянно вести дальнейшие разработки и исследования, направленные на повышение эффективности, оптимизацию конструкции всех основных систем, функциональных узлов турбогенераторов, в частности, системы охлаждения.

В последнее время наблюдается прогресс в развитии мощных турбогенераторов с воздушным охлаждением благодаря применению современных технических решений, внедрению высокоэффективных схем охлаждения, использованию современных электротехнических материалов и

технологий производства. В генераторах сокращены затраты на монтаж и повышена надёжность в эксплуатации из-за отсутствия масляных уплотнений вала ротора генератора, водородного хозяйства, системы циркуляции дистиллята.

На заводе «Электросила» современные решения, внедрённые в практику проектирования турбогенераторов с воздушным охлаждением мощностью до 225 МВт, позволили разработать турбогенератор с воздушным охлаждением мощностью 350 МВт, который в настоящее время находится в производстве. Технический уровень разработанного генератора соответствует уровню конкурентных аналогов, что подтверждается общедоступной информацией из докладов научно-технических конференций, публикаций по данной тематике [1–4] и информационных буклетов потенциальных конкурентов – ведущих мировых производителей энергетического оборудования.

Современные подходы к разработке системы охлаждения

В конструкциях современных высоконагруженных турбогенераторов с воздушным охлаждением большой мощности выявлены следующие основные направления в разработке систем охлаждения:

- создание эффективной системы охлаждения, в которой рационально распределены расходы охлаждающего воздуха по тракту вентиляции при минимальных затратах мощности;
- интенсификация охлаждения обмотки и сердечника статора;
- принятие конструктивных мер, направленных на снижение механических потерь в генераторе.

Турбогенераторы завода «Электросила» АО «Силовые машины» не являются здесь исключением и построены с использованием вышеперечисленных направлений. При разработке конструкции генераторов применен современный аппарат научного исследования и проектирования, в состав которого входят методы расчетно-теоретической проработки конструкций и экспериментальные методы, включающие лабораторное и физическое моделирование, результаты тепловых испытаний и исследований турбогенераторов с воздушным охлаждением на стенде завода и на местах эксплуатации. Принятые технические решения подтверждены многолетним опытом проектирования и эксплуатации турбогенераторов с воздушным охлаждением.

К вопросу рационального использования расхода охлаждающего воздуха и необходимости интенсификации охлаждения.

В турбогенераторах с воздушным охлаждением завода «Электросила» применяется эффективная вытяжная схема вентиляции [5–6], в которой исключено последовательное расположение основных источников тепла по ветвям вентиляционного тракта генератора и встречное действие источников давления. Схема вентиляции содержит два основных контура: статорный (центробежные вентиляторы, воздухоохладители и каналы сердечника статора) и роторный (самонапорный ротор с подпазовыми каналами, воздушный зазор генератора и воздухоохладители).

Система вентиляции, применяемая в турбогенераторах с воздушным охлаждением, позволяет при минимальных потерях мощности осуществить подачу охлажденного воздуха ко всем активным частям машины по многопараллельной вытяжной схеме. Для эффективного использования располагаемого расхода воздуха требуется оптимальное распределение воздушных потоков по вентиляционному тракту генератора с принятием мер по интенсификации охлаждения наиболее нагруженных в тепловом отношении активных частей – обмотки и зубцов сердечника статора.

Обмотка статора в генераторах с воздушным охлаждением имеет косвенное охлаждение, по этой причине является самым нагруженным в тепловом отношении конструктивным элементом генератора. Интенсификация охлаждения пакетов активной стали сердечника статора при сохранении габаритов генератора и удельных электромагнитных нагрузок встает на первый план.

Выполнено расчётное исследование влияния толщины пакетов активной стали и ширины каналов между пакетами на эффективность охлаждения сердечника при условии, что для всех

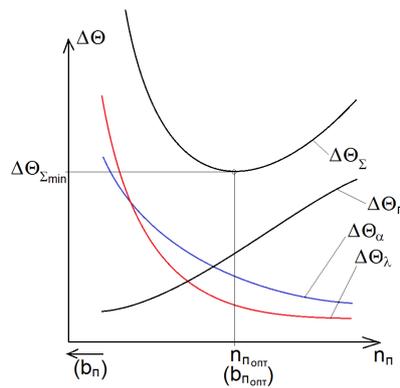


Рис. 1. Влияние толщины пакетов (количества пакетов) на составляющие превышения температуры активной стали над охлаждающим газом

Fig. 1. The effect of the lamination thickness (number of laminations) on the excessive heat components of the electrical steel over the cooling gas

возможных вариантов исполнения сердечника его длина, диаметральные габаритные размеры, размер паза и другие параметры остаются постоянными. Также соблюдается условие постоянства отношения толщины пакета к шагу по пакетам, равному сумме толщины пакета и ширины канала.

Максимальное превышение температуры стали пакета над охлаждающим газом $\Delta\Theta_{\Sigma}$ достигается в зубцовой зоне и определяется перепадом температуры поперёк пакета стали $\Delta\Theta_{\lambda}$ с коэффициентом поперечной теплопроводности пакета λ и конвективным перепадом температуры с поверхности стали $\Delta\Theta_{\alpha}$. Температура газа, охлаждающего пакеты стали, определяется начальной температурой газа, поступающего в охлаждающие каналы, и подогревом газа $\Delta\Theta_{\Gamma}$, отводящего тепло от омываемой поверхности. Таким образом, итоговая формула для определения превышения температуры пакета стали принимает вид:

$$\Delta\Theta_{\Sigma} = \Delta\Theta_{\Gamma} + \Delta\Theta_{\alpha} + \Delta\Theta_{\lambda}.$$

Все составляющие перепадов температур в приведённой формуле определяются конструктивным исполнением сердечника статора и электромагнитными потерями, выделяющимися в обмотке и стали сердечника. Результаты расчётного исследования приведены на рис. 1. Учтено влияние ширины каналов между пакетами на изменение подогрева газа за счёт изменения скорости и расхода газа в охлаждающих каналах при неизменной суммарной площади проходного сечения.

Определено оптимальное значение количества пакетов n_{Π} , либо их толщины b_{Π} , при котором превышение температуры активной стали будет минимальным (точка $n_{\Pi\text{опт}}$ – $\Delta\Theta_{\Sigma\text{min}}$ на рис. 1). Соответственно, именно к этому значению толщины пакетов активной стали следует стремиться при проектировании машины для снижения уровня температуры обмотки.

Система воздушного охлаждения пазовой зоны статора турбогенераторов с воздушным охлаждением. Эффективное охлаждение статора с помощью U-образных каналов (рис. 2) применяется в генераторах с воздушным охлаждением завода «Электросила» [6–9]. За счёт того, что U-образные каналы не сообщаются с воздушным зазором между статором и ротором, а также через них отводятся потери, выделяющиеся в пазовой части, в такой схеме вентиляции достигнуто практически равномерное распределение температуры по длине и окружности сердечника статора.

При использовании традиционных многоструйных схем вентиляции, применяемых зарубежными электромашиностроительными фирмами [1–2, 10–12], распределение температур в сердечнике носит неравномерный характер, поскольку часть сердечника снабжается воздухом из воздушного зазора между статором и ротором, значительно подогретым потерями ротора.

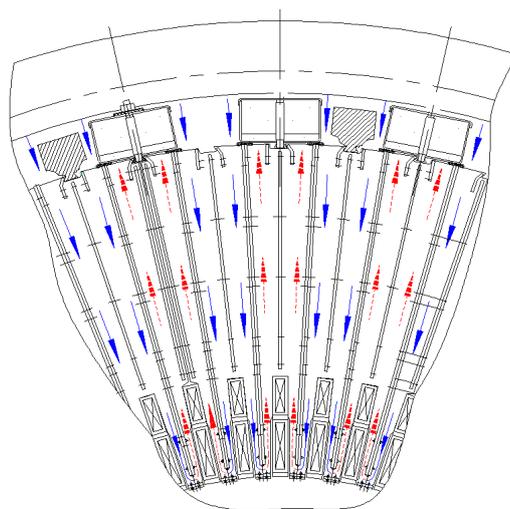


Рис. 2. Вентиляционная схема статора с U-образными каналами в сердечнике
 Fig. 2. Ventilation path of the stator with U-shaped ducts in the core

Для освоения более мощных турбогенераторов с газовым охлаждением может быть предложена иная конструкция охлаждающих каналов в сердечнике статора. За базу предлагаемой конструкции взяты принципы U-образного канала с чередованием напорных и вытяжных зон на периферии сердечника статора, однако при этом U-образный канал располагается в радиально-аксиальной плоскости [13–16]. Перепуск воздуха между соседними по длине сердечника радиальными каналами здесь осуществляется через аксиальные щелевые каналы, выполненные в зубцах сердечника. При этом каждый четный радиальный канал, получая холодный воздух из камеры нагнетания, сообщается с парой соседних нечетных каналов через аксиальные каналы в зубцах. Основным преимуществом новой системы охлаждения статора является искусственная турбулизация воздушных потоков при входе в аксиальные каналы, что повышает эффективность такой системы по сравнению с U-образными каналами.

В радиально-аксиальной схеме вентиляции с тремя и двумя каналами в зубце статора, приведённой на рис. 3 (а и б), показаны фрагменты сегментов сердечника статора с вентиляционными распорками, с помощью которых организуется движение охлаждающего воздуха в радиальном направлении канала между пакетами стали в сторону каналов в зубцах и из них в сторону периферии сердечника, а также распределение скоростей воздуха в указанном канале.

Проходное сечение аксиальных каналов и площадь их боковой поверхности, обеспечивающая теплопередачу от стали к воздуху, используются относительно более эффективно в варианте с двумя аксиальными каналами. Расходы воздуха через оба канала практически одинаковы (в средней части зубца 50,4% от общего расхода, вблизи расточки – 49,6%). При этом происходит снижение расхода воздуха через каналы сердечника статора на 9,3% по сравнению с U-образными каналами.

Как показали детальные тепловые расчёты, некоторое снижение общего уровня расхода охлаждающего воздуха в этой системе с избытком компенсируется интенсификацией воздушного охлаждения за счет искусственной турбулизации воздушных потоков при входе в аксиальные каналы, увеличения общей поверхности охлаждения, сокращения пути теплового потока из обмотки к поверхности аксиальных каналов и отсутствия тангенциального уравнивающего теплового потока в яре.

Существуют системы вентиляции сердечника статора, организованные при помощи аксиальных каналов, размещённых на дне пазов с обмоткой (см. рис. 4) [17].

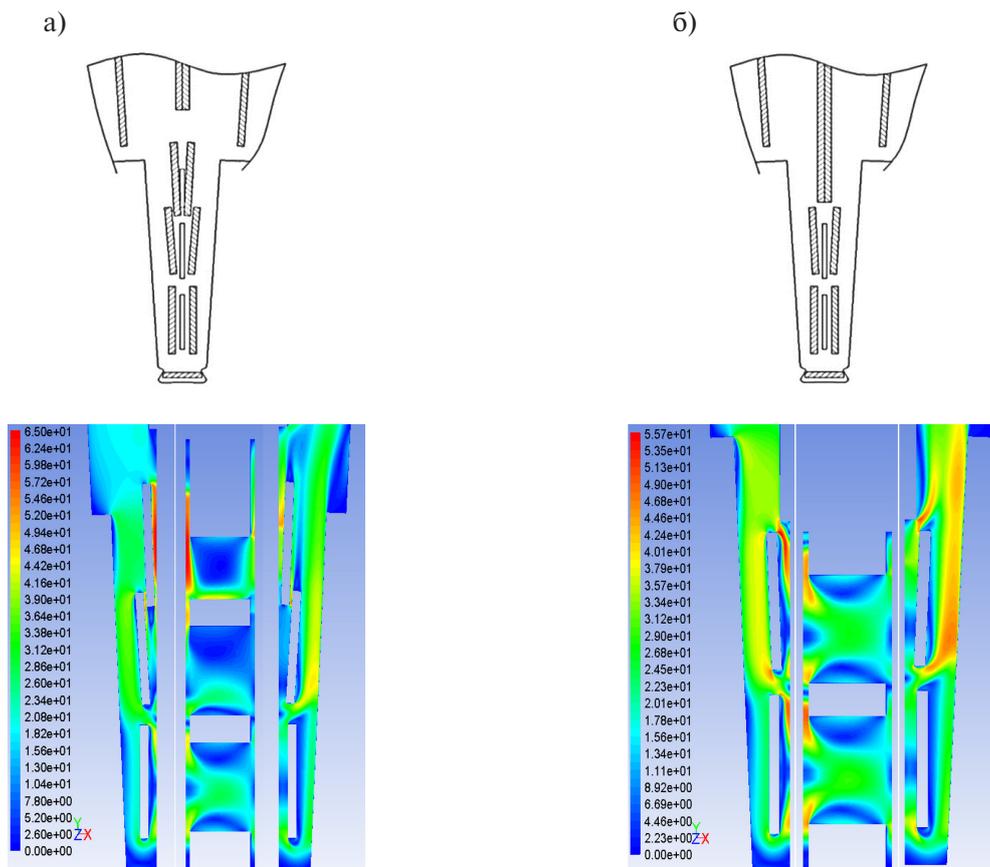


Рис. 3. Эскиз зубцовой зоны вентиляционного сегмента с тремя (а) и двумя (б) аксиальными каналами и распределение скорости в данной зоне (слева – подводящий радиальный канал; посередине – аксиальные щелевые каналы; справа – отводящий радиальный канал)

Fig. 3. Outline of the tooth zone of the ventilation segment with three (a) and two (b) axial ducts and the velocity distribution in this zone (on the left – the inlet radial duct; in the middle – axial slit ducts; on the right – the outlet radial duct)

Рассматриваемый радиальный канал обладает наименьшим собственным аэродинамическим сопротивлением: потери давления в нем на 30 % ниже, чем в U-образном канале. Однако, значительные потери давления в сборном аксиальном канале, отводящем горячий воздух в зону расположения лобовых частей обмотки статора, являются причиной снижения расхода воздуха через каналы сердечника статора более чем на 20% по отношению к варианту охлаждения при помощи U-образных каналов.

Вопрос выбора системы охлаждения обмотки и сердечника статора в генераторах с воздушным охлаждением связан с величиной электромагнитных потерь, выделяющихся в обмотке и зубах сердечника, которые необходимо отвести из активной зоны и обеспечить их требуемое тепловое состояние.

К вопросу снижения потерь в напорных элементах системы охлаждения

В генераторах с воздушным охлаждением около 50% всех потерь составляют механические потери в вентиляторах и затраты мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха в каналах ротора. Поэтому снижение указанных потерь представляется задачей крайне актуальной и является одним из действенных способов повышения КПД турбогенератора.

В вытяжной схеме вентиляции турбогенераторов с воздушным охлаждением завода «Электросила» напорными элементами системы охлаждения турбогенератора, обеспечивающими

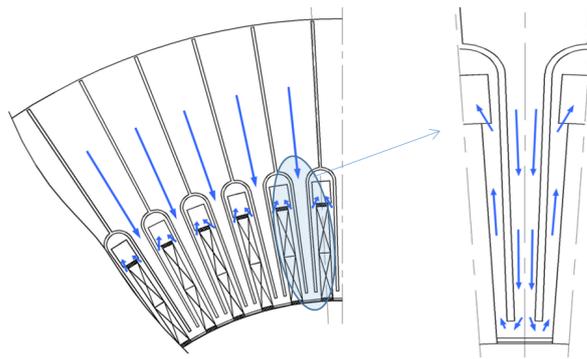


Рис. 4. Система охлаждения статора с подачей воздуха в надпазовые каналы

Fig. 4. Stator cooling path with air supply to the above-slot ducts

циркуляцию охлаждающей среды, являются центробежный вентилятор охлаждения статора и ротор, охлаждающие каналы в обмотке которого являются одновременно и напорным элементом, эквивалентным центробежному вентилятору с радиально ориентированными лопатками. Здесь следует сделать оговорку, что сам по себе напорный элемент, к какому бы контуру охлаждения он не относился, рассматривать будет некорректно без предшествующего элемента, формирующего ту или иную структуру потока на входе, влияющую на характеристики напорного элемента, а также без отводящего элемента, принимающего зачастую высокоскоростной поток от напорного элемента и обеспечивающий преобразование кинетической энергии скоростного потока в статическое давление с минимумом потерь, на сколько это возможно обеспечить с учётом имеющихся конструктивных ограничений.

С учётом сказанного, для контура охлаждения статора объектом расчёта и оптимизации является узел вентиляции в составе входного участка перед центробежным колесом, собственно центробежного колеса и отводящего элемента в виде сборной камеры или улитки. При этом входной участок не имеет в своём составе каких-либо лопаточных аппаратов, оказывающих воздействие на поток, что связано, в том числе, с неоднородной, сложной структурой потока на этом участке, поэтому здесь следует исходить из общих рекомендаций к проектированию подобных узлов, предусматривая плавные обводы проточной части в меридиональной плоскости и исключая малые радиусы поворота потока. Центробежный вентилятор также может быть спроектирован с использованием классических отработанных методик и не вызывает серьёзных трудностей. Наиболее проблемным элементов контура охлаждения статора остаётся при этом выходная улитка, принимающая высокоскоростной поток от вентилятора и направляющая его к воздуховоду, расположенному сверху корпуса генератора и отводящего воздух к воздухоохладителям. Проблема усугубляется и тем, что уже на входе в центробежный вентилятор присутствует ощутимая закрутка потока, связанная с влиянием сильно закрученного потока, приходящего из зазора между ротором и статором. В результате на выходе из вентилятора, не являющегося высоконапорным, окружная компонента скорости приближается тем не менее к значению порядка 100 м/с при умеренной расходной (радиальной) компоненте порядка 30–40 м/с. Сложность проектирования улитки обусловлена и тем, что улитка является диффузорным элементом, который должен обеспечивать существенное замедление потока воздуха, поступающего из колеса вентилятора, с одновременным разворотом этого потока к выходному окну, расположенному в верхней части корпуса машины. Оба отмеченных фактора – и замедление потока, и поворот потока, могут послужить причиной существенных потерь. Конкретные технические решения, позволившие в конечном итоге существенно снизить потери в улитке и в системе охлаждения генератора в целом, будут подробно изложены в следующем разделе на конкретном примере.

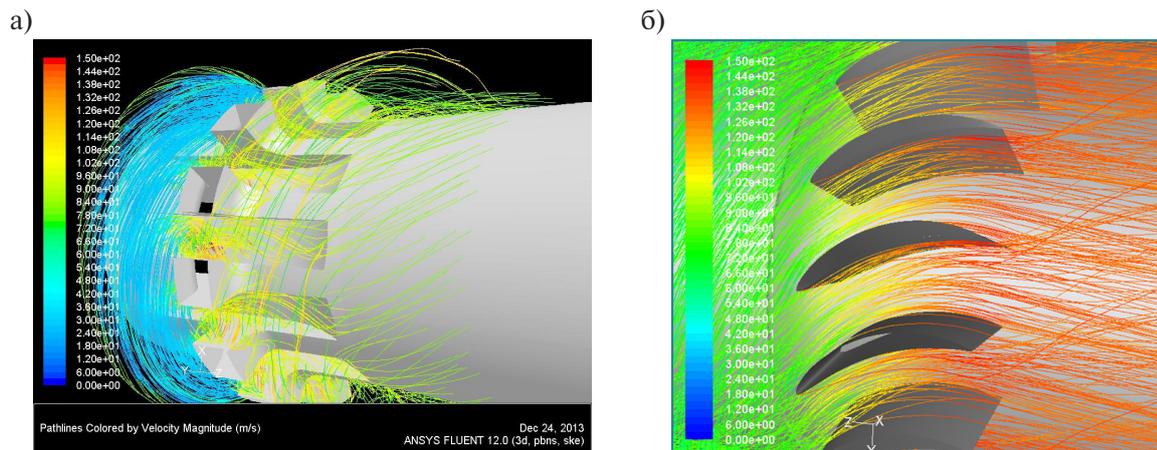


Рис. 5. Конструктивные варианты исполнения вращающегося направляющего аппарата ротора
 Fig. 5. Design variants of the rotating guide vane of the rotor

Переходя к напорному элементу контура охлаждения ротора – радиальным охлаждающим каналам в обмотке, можно заметить совершенно другую специфику. В данном случае выход воздуха осуществляется в зазор между ротором и статором, данный участок проточной части не может являться предметом какой-либо оптимизации, несмотря на огромную кинетическую энергию потока на выходе, обусловленную окружной скоростью ротора порядка 160–180 м/с. Сами напорные элементы – радиальные охлаждающие каналы также не могут являться предметом оптимизации, так как в первую очередь их конфигурация определяется конструктивным исполнением обмотки ротора и требованиями к обеспечению её теплового состояния. Но снижение потерь может быть достигнуто благодаря грамотному проектированию входных элементов – направляющих лопаточных аппаратов, устанавливаемых на входном участке. Причём оптимальный результат может быть достигнут только в случае грамотного использования как неподвижного направляющего аппарата (ННА), монтируемого в канале подвода воздуха к подбандажному пространству ротора, так и вращающегося направляющего аппарата (ВНА), устанавливаемого на самом роторе и выполняемого в виде шлицов, либо по типу осевого вентилятора (рис. 5, а и б, соответственно). Первый вариант конструктивно проще, но как показывает численное исследование, течение в нём сопровождается более высокими потерями, а структура потока на выходе получается неоднородной, при этом остаётся некоторое отставание потока от окружной скорости. Тем не менее, для мало и средненагруженных машин данное решение обеспечивает зачастую вполне приемлемые результаты и является оптимальным с учётом меньших затрат на его реализацию.

Возвращаясь к вопросу использования грамотного сочетания именно двух направляющих аппаратов – неподвижного и вращающегося [18–19], следует обратить внимание на следующие физические эффекты, возникающие при течении воздуха через узел вентиляции ротора.

Подвод энергии к потоку воздуха, т.е. приращение полной температуры воздуха и удельный напор, потребляемый на прокачку воздуха, описывается уравнением

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

где u_2 , u_1 и c_{u2} , c_{u1} – окружная скорость ротора и окружная компонента скорости потока на выходе и на входе в ротор, соответственно.

Здесь очевидно, что в случае течения воздуха через радиальные каналы ротора $c_{u2} = u_2$, определяется имеющимся конструктивными особенностями ротора и не может являться предметом какой-либо оптимизации. Окружная скорость на входе в радиальные охлаждающие каналы

ротора определяется конструкцией обмотки (радиусом расположения её нижнего витка) и также не является предметом оптимизации. В результате, окружная скорость потока на входе в ротор c_{u1} является здесь единственным варьируемым параметром, при этом воздействие на неё позволяет добиться существенного снижения затрат мощности на охлаждение ротора при сохранении его исходного теплового состояния.

Влияние начальной окружной скорости потока на входе в ротор c_{u1} проявляется одновременно в двух противоположных направлениях. Во-первых, как следует из ранее приведённой формулы, увеличение c_{u1} неизбежно ведёт к уменьшению удельного напора, подводимого к воздуху ротором, а это вызывает соответствующий отклик по вентиляционному подогреву воздуха в зоне охлаждаемой обмотки $\Delta\Theta_{\text{вент}}$ и по потребляемой на вентиляцию мощности $N_{\text{вент}}$:

$$\Delta\Theta_{\text{вент}} = \Delta\Theta_{\text{вент}0} - (c_{u1} * u_1) / c_p ;$$

$$N_{\text{вент}} = m * h = m * (h_0 - c_{u1} * u_1),$$

где $\Delta\Theta_{\text{вент}0}$ – исходное значение вентиляционного подогрева воздуха в зоне охлаждающих каналов обмотки при $c_{u1} = 0$; c_p – теплоёмкость воздуха; h_0 – исходное значение подводимого удельного напора при $c_{u1} = 0$.

Во-вторых, при закрутке потока в неподвижном направляющем аппарате неизбежно снижается статическое давление воздуха, трансформируясь в динамическое. Соответственно, снижается полезный перепад статического давления, развиваемый узлом вентиляции:

$$\Delta p = \Delta p_0 - (\rho c_{u1}^2 / 2),$$

где Δp_0 – перепад статического давления, развиваемый узлом вентиляции ротора при $c_{u1} = 0$; ρ – плотность воздуха.

Развиваемый перепад давления уравнивается гидравлическими потерями в контуре охлаждения ротора:

$$\Delta p = \xi \cdot \rho V^2,$$

где ξ – приведённый коэффициент гидравлического сопротивления контура; V – объёмный расход через контур, определяющий скорости во всех его сечениях.

Отмеченное снижение развиваемого перепада давлений приводит к падению расхода воздуха через ротор и скорости во всех сечениях данного контура, включая и охлаждающие каналы ротора:

$$m = \rho V = \rho \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho \xi}} = \rho \sqrt{\frac{\Delta p_0 - \left(\frac{\rho c_{u1}^2}{2}\right)}{\rho \xi}}.$$

Соответственно, рост c_{u1} приведёт, с одной стороны, к ещё большему снижению потребляемой мощности на вентиляцию за счёт снижения расхода воздуха одновременно со снижением подводимого напора (см. формулу *), что является положительным эффектом, но с другой стороны, приведёт к большему подогреву охлаждающего воздуха $\Delta\Theta_Q$ в радиальных каналах ротора, обусловленному отводимыми тепловыделениями обмотки Q , а также к большему конвективному перепаду температур в охлаждающих каналах $\Delta\Theta_a$:

$$\Delta\Theta_Q = Q / (m \cdot c_p), \text{ т.е. } \Delta\Theta_Q / \Delta\Theta_{Q0} = m_0 / m;$$

$$\alpha = A \cdot c_{\kappa}^B, \text{ где } B = 0,6 \dots 0,8, \text{ тогда:}$$

$$\Delta\Theta_{\alpha} = Q / (F \cdot \alpha) = Q / (F \cdot A c_{\kappa}^B), \text{ т.е. } \Delta\Theta_{\alpha} / \Delta\Theta_{\alpha 0} \approx (m_0 / m)^{0,6 \dots 0,8},$$

где α – коэффициент теплоотдачи в радиальных каналах ротора; A и B – эмпирические коэффициенты, определяющие теплоотдачу при турбулентном режиме в радиальных охлаждающих каналах с искусственной макрошероховатостью, образованной уложенными друг на друга витками обмотки; F – общая площадь поверхности теплоотдачи радиальных каналов.

Два описанных температурных перепада формируют общую составляющую превышения температуры обмотки $\Delta\Theta_{\text{эл}}$, обусловленную тепловыделениями от прохождения электрического тока в ней, над охлаждающим её воздухом:

$$\Delta\Theta_{\text{он}} = 0,5 \cdot \Delta\Theta_Q + \Delta\Theta_{\alpha}.$$

Множитель 0,5 при $\Delta\Theta_Q$ обусловлен тем, что средний подогрев охлаждающего воздуха, воспринимающего тепловыделения от обмотки, в охлаждающих каналах обмотки меняется от 0 на входе в них до $\Delta\Theta_Q$ на выходе.

Комплексное воздействие рассмотренных эффектов определяет итоговую температуру обмотки, что показано на рис. 6 на примере обмотки ротора одного из генераторов завода «Электросила». По оси «X» отложена безразмерная окружная скорость потока в сечении перед ВНА, формируемая неподвижным направляющим аппаратом: $k = c_{\text{убНА}} / u_{\text{ВНА}}$, где $c_{\text{убНА}}$ и $u_{\text{ВНА}}$ – окружная компонента скорости потока в сечении на входе в ВНА и окружная скорость вращения ВНА.

Расчёты показывают, что при характерных рабочих значениях окружных скоростей ротора, тепловыделений в обмотке и расходах охлаждающего воздуха возрастание $\Delta\Theta_{\text{эл}}$ и падение $\Delta\Theta_{\text{вент}}$ происходят таким образом, что их сумма $\Delta\Theta_{\text{м}} = \Delta\Theta_{\text{эл}} + \Delta\Theta_{\text{вент}}$, определяющая подогрев обмотки относительно охлаждающего воздуха, вначале убывает, затем начинает возрастать. Это поведение результирующей кривой позволяет выделить на ней две характерных точки, представляющих практический интерес:

- $k \approx 0,35$ – закрутка перед ВНА обеспечивает минимальную температуру обмотки с одновременным уменьшением потерь на вентиляцию относительно исходного варианта ($k = 0$);
- $k \approx 0,7$ – закрутка перед ВНА обеспечивает то же значение температуры обмотки, как у исходного варианта с $k = 0$, но с существенным снижением потерь на вентиляцию на 20–30% относительно варианта с $k = 0$.

На практике больший интерес представляет второй вариант, обеспечивающий уменьшение вентиляционных потерь в среднем на 25%.

Снижение вентиляционных потерь в контуре охлаждения статора.

Модернизация улитки центробежного вентилятора

Как было отмечено ранее, наиболее проблемным элементом в узле вентилятора статора является именно улитка, назначение которой – равномерно по окружности принять высокоскоростной воздушный поток, выбрасываемый вентилятором, и с наименьшими потерями направить его к воздухоохладителям статорного контура. При проектировании выходных улиток узла вентиляции статора на заводе «Электросила» изначально, до появления современных методов конечно-элементных полевых расчётов течения, практиковался подход с использованием многорукавной улитки. Техническое решение с разбиением объёма улитки промежуточными перегородками на

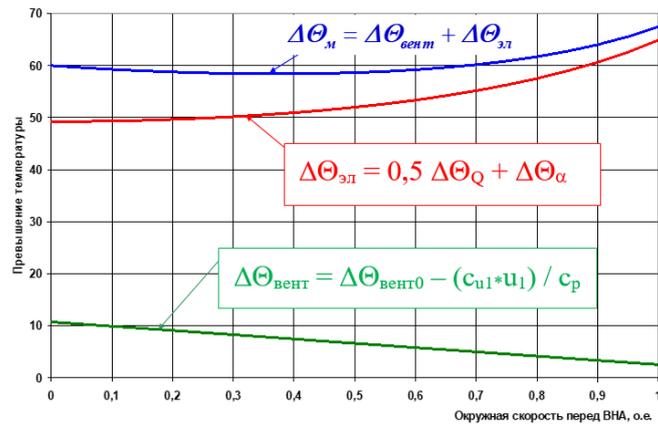


Рис. 6. Превышения температуры в зависимости от окружной скорости
 Fig. 6. Excessive heat depending on the circumferential velocity

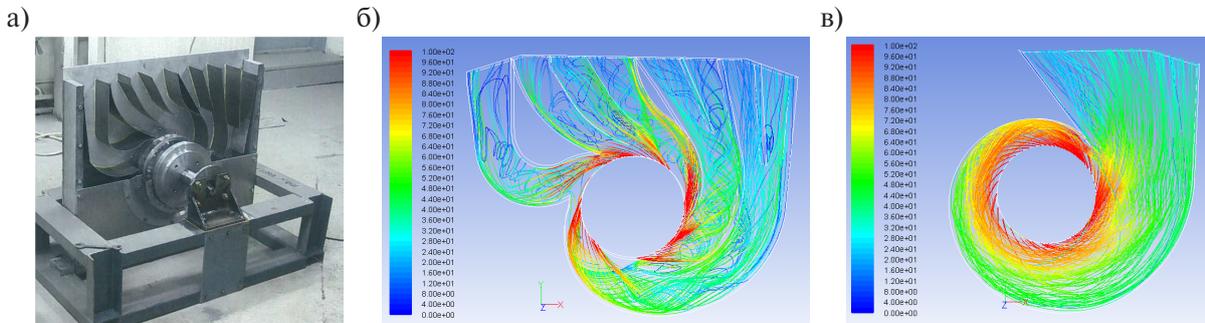


Рис. 7. Улитка центробежного вентилятора: а – макет улитки в уменьшенном масштабе на испытательном стенде; б и в – трёхмерное моделирование: линии тока в улитке исходной конструкции и модернизированной спиральной улитке, окрашенные в цвет скорости
 Fig. 7. Volute housing of the centrifugal fan: а – the mockup of the volute in a reduced scale on the test bench; б and c – 3D modeling: current lines in the volute of the original design and the upgraded spiral volute, painted in the color of speed

отдельные каналы выглядело абсолютно обоснованным с точки зрения классической одномерной теории. Появление современных инструментов расчёта трёхмерных течений и экспериментальное исследование на модели позволили выявить слабые стороны исходной конструкции. Как показали подробные трёхмерные расчёты, она не учитывала ряд существенных моментов, сильно искажающих исходную одномерную модель течения: расширение потока при входе в улитку, различное гидравлическое сопротивление её каналов приводили к перераспределению расходов между каналами улитки, обтеканию разделительных рёбер с большими углами атаки, возникновению существенных зон отрыва и, в конечном итоге, к высоким потерям. Выполненное экспериментальное и расчётное исследование, оптимизация с использованием современных пакетов конечноэлементных полевых расчётов течения позволили перейти к использованию эффективной спиральной улитки, спроектированной из условий равномерного распределения расхода воздуха по окружности и постоянства циркуляции потока $c_u * r = const$ и имеющей в меридиональной плоскости постоянную ширину после начального участка с большим углом раскрытия стенок. Конструкция улитки и структура потока при исходной и модернизированной конструкции показаны на рис. 7.

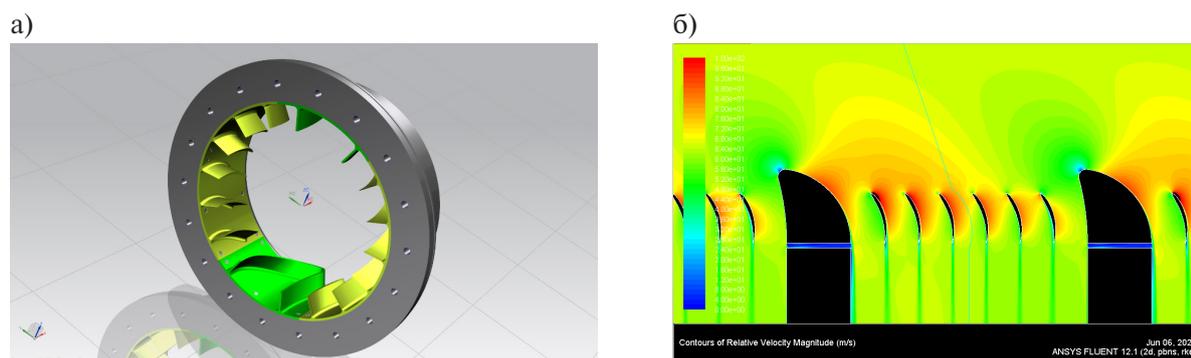


Рис. 8. Вращающийся направляющий аппарат ротора (а) и расчётное поле скоростей в нём (б)

Fig. 8. Rotating guide vane of the rotor (a) and the its calculated velocity field (b)

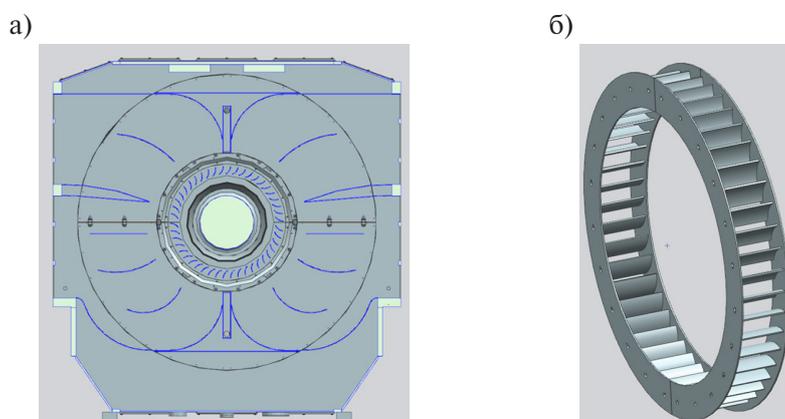


Рис. 9. Подводящий канал ротора (а) и неподвижный направляющий аппарат ротора (б)

Fig. 9. Feed duct of the rotor (a) and the fixed guide device of the rotor (b)

Модернизация узла подачи охлаждающего воздуха в ротор

Модернизация, дающая весьма ощутимый эффект по снижению потерь на циркуляцию воздуха, была впервые проведена в контуре охлаждения ротора турбогенератора мощностью 160 МВт. Схема вентиляции ротора в генераторах с воздушным охлаждением выполнена таким образом, что воздух после воздухоохладителей за счёт разрежения, создаваемого самонапорным ротором, поступает в радиальном направлении к каналу, образованному с внешней стороны ступицей вентилятора статора, а с внутренней – валом ротора. Проходя по этому каналу, незакрученный поток воздуха входит во вращающийся направляющий аппарат, роль которого в генераторе мощностью 160 МВт выполняют шлицы (см. рис. 5, а), одновременно обеспечивающие крепление на валу ступицы центробежного вентилятора охлаждения статора. Шлицами воздух закручивается в окружном направлении до скорости, близкой к окружной скорости ротора, и уже движущийся практически с окружной скоростью ротора поток поступает в подбандажное пространство ротора и далее – в подпазовые и охлаждающие радиальные каналы ротора [20–21].

В мощных турбогенераторах с воздушным охлаждением вращающийся направляющий аппарат ротора имеет более совершенную в аэродинамическом плане конструкцию, показанную на рис. 8.

С учётом теоретических предпосылок, изложенных в начале настоящей статьи, был спроектирован и установлен в подводящем канале к ротору (рис. 9, а) неподвижный направляющий аппарат, раскручивающий поток перед ВНА примерно до 60% окружной скорости ВНА (рис. 9, б).

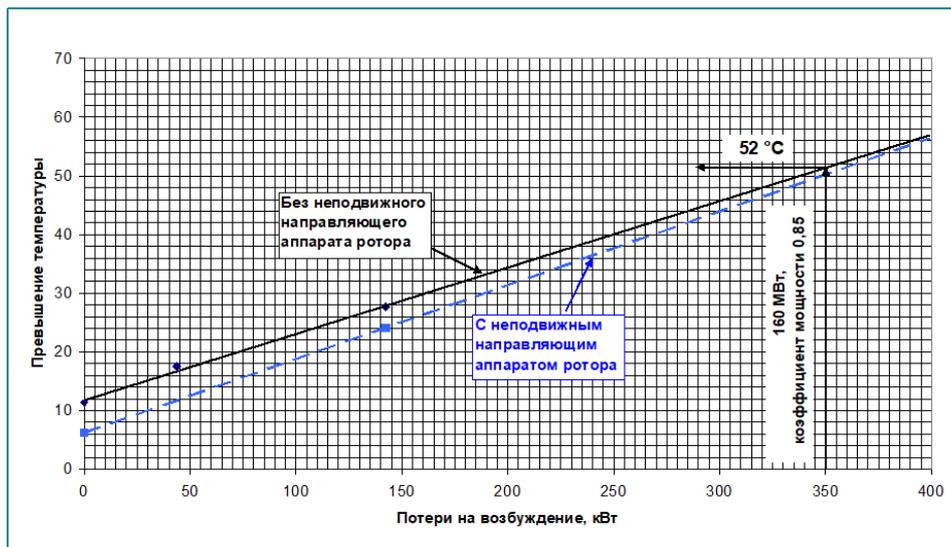


Рис. 9. Зависимость среднего превышения температуры обмотки ротора от потерь на возбуждение

Fig. 9. Dependence of the average excessive heat of the rotor winding on the excitation losses

Результат данной модернизации представлен на рис. 10. Видно, что при номинальной нагрузке тепловое состояние обмотки ротора турбогенератора мощностью 160 МВт с модернизированной системой охлаждения осталось неизменным, при этом отчётливо прослеживается снижение температуры ротора при работе на холостом ходу с нулевыми тепловыделениями в обмотке, что связано с рассмотренным ранее эффектом уменьшения вентиляционного подогрева охлаждающего воздуха. Одновременно со снижением вентиляционного подогрева снизился массовый расход воздуха и затраты мощности на вентиляцию.

Результаты многовариантных аэродинамических расчётов и их экспериментальная проверка позволили существенно повысить КПД генераторов с воздушным охлаждением. В генераторе мощностью 160 МВт с воздушным охлаждением КПД был повышен с 98,6 % до 98,8 % за счёт снижения затрат мощности на циркуляцию воздуха в каналах ротора и минимизации потерь в узле центробежного вентилятора при сохранении исходного теплового состояния активных частей генератора.

Выводы

1. Современная концепция системы воздушного охлаждения турбогенераторов большой мощности направлена на минимизацию вентиляционных потерь в турбогенераторе при одновременном повышении интенсификации охлаждения обмотки и сердечника статора за счет предложенных в статье систем охлаждения сердечника статора.

2. Достигнуто существенное повышение КПД турбогенераторов за счет снижения механических потерь, обусловленных циркуляцией воздуха в турбогенераторе, на 25% при помощи модернизации улитки центробежного вентилятора, установки неподвижного лопаточного аппарата в контуре подачи воздуха в ротор и снижения потерь давления в тракте подачи воздуха из улитки к воздухоохлаждаителям.

3. Результаты аэродинамических расчетов и экспериментально подтверждено, что в турбогенераторах большой мощности с воздушным охлаждением обмотки ротора целесообразно использовать вращающийся направляющий аппарат в сочетании с неподвижным направляющим аппаратом, причём наилучший эффект достигается при использовании вращающегося направляющего аппарата в форме осевого вентилятора.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] 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.
- [2] Priano M., Tartaglione V. A new 400 MVA air cooled turbogenerator from Ansaldo Energia // Power-Gen Europe, Milan, 2016.
- [3] Кади-Оглы И.А., Шаров В.И., Карташова Т.Н., Антонов Ю.Ф., Пафомов Ю.В., Мигас А.Г. Способ газового охлаждения электрической машины и электрическая машина // Пат. 2 258 295 Российская Федерация, МПК H02K 9/06, H02K 9/16, H02K 9/18; заявитель и патентообладатель ОАО Силовые машины. № 2003113260/09; заявл. 05.05.2003; опубл. 10.08.2005, Бюл. № 22. 11 с.: 1 ил.
- [4] Маннанов Э.Р., Костельов А.М., Филин А.Г., Железняк В.Н. Повышение эксплуатационной надёжности турбогенераторов с воздушным охлаждением для газотурбинной установки // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–89.
- [5] Дубровин Ю.Н., Кади-Оглы И.А., Карташова Т.Н., Шаров В.И. Развитие системы воздушного охлаждения турбогенераторов серии ТЗФ. – В кн.: Сборник «Электросила» – СПб: Электросила, 2003, № 42, с. 44–50.
- [6] Кади-Оглы И.А., Шаров В.И., Карташова Т.Н., Антонов Ю.Ф., Пафомов Ю.В., Мигас А.Г. Способ газового охлаждения электрической машины и электрическая машина // Пат. 2 258 295 Российская Федерация, МПК H02K 9/06, H02K 9/16, H02K 9/18; заявитель и патентообладатель ОАО Силовые машины. № 2003113260/09; заявл. 05.05.2003; опубл. 10.08.2005, Бюл. № 22. 11 с.: 1 ил.
- [7] Шалаев В.Г., Кади-Оглы И.А. Система вентиляции электрической машины // Пат. 2 095 919 Российская Федерация, МПК H02K 9/08; заявитель и патентообладатель Шалаев В.Г., Кади-Оглы И.А. № 96114673/07; заявл. 11.07.1996; опубл. 10.11.1997, 6 с.: 3 ил.
- [8] Гуревич Э.И., Пафомов Ю.В., Пермут А.С. Экспериментальное исследование теплоотдачи в U-образных каналах статора турбогенератора с воздушным охлаждением. Сб. «Электросила», № 43, 2004. С. 77–82.
- [9] Филин А.Г., Голубков В.Д., Шишкина И.А. Оптимизация расчетных алгоритмов определения теплового состояния активных частей турбогенератора. Материаловед. Энерг. 2021. 27, N 4, с. 5–18. Рус.
- [10] Dong Jiangwei, Zhang Huawei, Gu Dongsheng, Chen Xu, Wu Yuhao Yuan Lin. Air-cooled steam turbine generator // Пат. CN116094202 Китай, МПК H02K 1/20, H02K 5/04, H02K 5/20, H02K 15/02, H02K 15/12; заявитель и патентообладатель Shandong Qilu Electrical Machinery. № 2022CN-1335013; заявл. 2022-10-28, опубл. 2023-05-09, 10 с.: 5 ил.
- [11] Han Jichao, Dong Jiechen, Liu Yufei, Wang Yang. Novel two-side multi-stage counter-flow type axial-radial ventilation cooling system of half-speed steam turbine generator // Пат. CN113014038 Китай, МПК H02K 1/20, H02K 1/32, H02K 3/24, H02K 9/08; заявитель и патентообладатель Harbin University Of Science & Technology. № 2021CN-0262429; заявл. 2021-03-11, опубл. 2022-11-22, 13 с.: 9 ил.
- [12] Dong Jiangwei, Wang Zhengping, Chen Xu, Xin Lei, Yuan Lin. Air path structure of air-cooled gas turbine generator with underlying air cooler // Пат. CN114649905 Китай, МПК H02K 1/20, H02K 1/32, H02K 3/22, H02K 3/24, H02K 5/20, H02K 9/04, H02K 9/06; заявитель и патентообладатель Shandong Qilu Electrical Machinery. № 2022CN-0228638; заявл. 2022-03-08, опубл. 2022-06-21, 8 с.: 6 ил.
- [13] Антонюк О.В., Карташова Т.Н., Пафомов Ю.В., Гуревич Э.И. Статор электрической машины // Пат. 2 350 006 Российская Федерация, МПК H02K 9/04, H02K 1/20; заявитель и патентообладатель ОАО Силовые машины. № 2007122366/09; заявл. 04.06.2007; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8. 10 с.: 4 ил.
- [14] Рыжков В.В., Дергачев П.А., Курбатова Е.П., Молоканов О.Н., Курбатов П.А. Построение трехмерной тепловой модели статора турбогенератора с учетом газодинамики. Вестн. МЭИ. 2021, N 5, с. 75–82.
- [15] Antonyuk O., Gurevich Z., Pafomov Yu. An Experimental Determination Of The Heat-Transfer Coefficients In The Channels Of A Turbogenerator Stator With Air And Hydrogen Cooling // Power Technology and Engineering Vol. 48, No. 3, September, 2014.

- [16] Маннанов Э.Р., Филин А.Г. Тепловое состояние электрической изоляции статорных обмоток турбогенераторов с воздушным охлаждением // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 2. С. 38–49.14.
- [17] Шалаев В.Г. Система охлаждения статора электрической машины // Пат. 2 246 786 Российская Федерация, МПК H02K 9/08, 1/20.; заявитель и патентообладатель АО Силовые машины. № 200-3121301/09; заявл. 09.07.2003; опубл. 20.02.2005, Бюл. №5. 6 с.: 2 ил.
- [18] 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.
- [19] Антонюк О.В., Карташова Т.Н., Прокофьев А.Ю. Электрическая машина с направляющими аппаратами в системе охлаждения ротора // Пат. 2 560 721 Российская Федерация, МПК H02K 9/16, H02K 9/04, H02K 1/32; заявитель и патентообладатель ОАО Силовые машины. № 2014128060/07; заявл. 08.07.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23. 7 с.: 1 ил.
- [20] Верховцев Д.А., Гуревич Э.И., Коровкин Н.В. О тепловом состоянии обмотки ротора турбогенератора с самовентиляцией из подпазового канала // *Электрические станции*. 2021, № 5.
- [21] Verkhovtsev D.A., Gurevich E.I., Korovkin N.V. On the Thermal State of the Rotor Winding of a Turbo-Generator with Self-Ventilation from the Sub-Slot Channel // *Power Technology and Engineering*. 2021, vol. 55.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАРТАШОВА Татьяна Николаевна – начальник сектора, ПАО "Силовые машины", канд. техн. наук.

E-mail: Kartashova_TN@power-m.ru

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

ПРОКОФЬЕВ Алексей Юрьевич – главный специалист, ПАО "Силовые машины", канд. техн. наук.

E-mail: Prokofev_AY@power-m.ru

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

ФИЛИН Алексей Григорьевич – главный специалист, 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>

REFERENCES

- [1] 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
- [2] M. Priano, V. Tartaglione, A new 400 MVA air cooled turbogenerator from Ansaldo Energia // *Power-Gen Europe*, Milan, 2016.
- [3] I.A. Kadi-Ogly, V.I. Sharov, T.N. Kartashova, Yu.F. Antonov, Yu.V. Pafomov, A.G. Migas, Sposob gazovogo okhlazhdeniya elektricheskoy mashiny i elektricheskaya mashina // Пат. 2 258 295 Rossiyskaya Federatsiya, МПК H02K 9/06, H02K 9/16, H02K 9/18; заявитель и патентообладатель ОАО Silovyye mashiny. № 2003113260/09; заявл. 05.05.2003; опубл. 10.08.2005, Byul. № 22. 11 с.: 1 ил.
- [4] E.R. Mannanov, A.M. Kostelov, A.G. Filin, V.N. Zheleznyak, Povysheniye ekspluatatsionnoy nadezhnosti turbogeneratorov s vozdushnym okhlazhdeniyem dlya gazoturbinnoy ustanovki // *Globalnaya energiya*. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–89.

[5] **Yu.N. Dubrovin, I.A. Kadi-Ogly, T.N. Kartashova, V.I. Sharov**, Razvitiye sistemy vozdušnogo okhlazhdeniya turbogeneratorov serii T3F. – V kn.: Sbornik «Elektrosila» – SPb: Elektrosila, 2003, № 42, s. 44–50.

[6] **I.A. Kadi-Ogly, V.I. Sharov, T.N. Kartashova, Yu.F. Antonov, Yu.V. Pafomov, A.G. Migas**, Sposob gazovogo okhlazhdeniya elektricheskoy mashiny i elektricheskaya mashina // Pat. 2 258 295 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H02K 9/06, H02K 9/16, H02K 9/18; zayavitel i patentoobladatel OAO Silovyye mashiny. № 2003113260/09; zayavl. 05.05.2003; opubl. 10.08.2005, Byul. № 22. 11 s.: 1 il.

[7] **V.G. Shalayev, I.A. Kadi-Ogly**, Sistema ventilyatsii elektricheskoy mashiny // Pat. 2 095 919 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H02K 9/08; zayavitel i patentoobladatel Shalayev V.G., Kadi-Ogly I.A. № 96114673/07; zayavl. 11.07.1996; opubl. 10.11.1997, 6 s.: 3 il.

[8] **E.I. Gurevich, Yu.V. Pafomov, A.S. Permut**, Eksperimentalnoye issledovaniye teplootdachi v U-obraznykh kanalakh statora turbogeneratora s vozdušnym okhlazhdeniyem. Sb. «Elektrosila», № 43, 2004. S. 77–82.

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

[10] **Dong Jiangwei, Zhang Huawei, Gu Dongsheng, Chen Xu, Wu Yuhao Yuan Lin**, Air-cooled steam turbine generator // Pat. CN116094202 Kitay, MPK H02K 1/20, H02K 5/04, H02K 5/20, H02K 15/02, H02K 15/12; zayavitel i patentoobladatel Shandong Qilu Electrical Machinery. № 2022CN-1335013; zayavl. 2022-10-28, opubl. 2023-05-09, 10 s.: 5 il.

[11] **Han Jichao, Dong Jiechen, Liu Yufei, Wang Yang**, Novel two-side multi-stage counter-flow type axial-radial ventilation cooling system of half-speed steam turbine generator // Pat. CN113014038 Kitay, MPK H02K 1/20, H02K 1/32, H02K 3/24, H02K 9/08; zayavitel i patentoobladatel Harbin University Of Science & Technology. № 2021CN-0262429; zayavl. 2021-03-11, opubl. 2022-11-22, 13 s.: 9 il.

[12] **Dong Jiangwei, Wang Zhengping, Chen Xu, Xin Lei, Yuan Lin**, Air path structure of air-cooled gas turbine generator with underlying air cooler // Pat. CN114649905 Kitay, MPK H02K 1/20, H02K 1/32, H02K 3/22, H02K 3/24, H02K 5/20, H02K 9/04, H02K 9/06; zayavitel i patentoobladatel Shandong Qilu Electrical Machinery. № 2022CN-0228638; zayavl. 2022-03-08, opubl. 2022-06-21, 8 s.: 6 il.

[13] **O.V. Antonyuk, T.N. Kartashova, Yu.V. Pafomov, E.I. Gurevich**, Stator elektricheskoy mashiny // Pat. 2 350 006 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H02K 9/04, H02K 1/20; zayavitel i patentoobladatel OAO Silovyye mashiny. № 2007122366/09; zayavl. 04.06.2007; opubl. 20.03.2009, Byul. № 8. 10 s.: 4 il.

[14] **V.V. Ryzhov, P.A. Dergachev, Ye.P. Kurbatova, O.N. Molokanov, P.A. Kurbatov**, Postroyeniye trekhmernoy teplovoy modeli statora turbogeneratora s uchetom gazodinamiki. Vestn. MEI. 2021, N 5, s. 75–82.

[15] **O. Antonyuk, Z. Gurevich, Yu. Pafomov**, An Experimental Determination Of The Heat-Transfer Coefficients In The Channels Of A Turbogenerator Stator With Air And Hydrogen Cooling // Power Technology and Engineering Vol. 48, No. 3, September, 2014.

[16] **E.R. Mannanov, A.G. Filin**, Teplovoye sostoyaniye elektricheskoy izolyatsii statornykh obmotok turbogeneratorov s vozdušnym okhlazhdeniyem // Materialovedeniye. Energetika. 2021. T. 27, № 2. S. 38–49.14.

[17] **V.G. Shalayev**, Sistema okhlazhdeniya statora elektricheskoy mashiny // Pat. 2 246 786 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H02K 9/08, 1/20.; zayavitel i patentoobladatel AO Silovyye mashiny. № 2003121301/09; zayavl. 09.07.2003; opubl. 20.02.2005, Byul. №5. 6 s.: 2 il.

[18] **T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofyev, A.G. Filin**, Povysheniye intensivnosti okhlazhdeniya rotorov turbogeneratorov s gazovym okhlazhdeniyem // Sbornik rabot laureatov mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye toplivno-energeticheskoy i dobyvayushchey otrasli 2021. (2021) 189–193.

[19] **O.V. Antonyuk, T.N. Kartashova, A.Yu. Prokofyev**, Elektricheskaya mashina s napravlyayushchimi aparatami v sisteme okhlazhdeniya rotora // Pat. 2 560 721 Rossiyskaya Federatsiya, MPK H02K 9/16, H02K 9/04, H02K 1/32; zayavitel i patentoobladatel OAO Silovyye mashiny. № 2014128060/07; zayavl. 08.07.2014; opubl. 20.08.2015, Byul. № 23. 7 s.: 1 il.

[20] **D.A. Verkhovtsev, E.I. Gurevich, N.V. Korovkin**, O teplovom sostoyanii obmotki rotora turbogeneratora s samoventilyatsiyey iz podpazovogo kanala // Elektricheskoye stantsii. 2021, № 5.

[21] **D.A. Verkhovtsev, E.I. Gurevich, N.V. Korovkin**, On the Thermal State of the Rotor Winding of a Turbo-Generator with Self-Ventilation from the Sub-Slot Channel // *Power Technology and Engineering*. 2021, vol. 55.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Tatyana N. KARTASHOVA – PJSC "Power Machines".

E-mail: Kartashova_TN@power-m.ru

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

Aleksei Yu. PROKOFEV – PJSC "Power Machines".

E-mail: Prokofev_AY@power-m.ru

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

Aleksei G. FILIN – 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>

Поступила: 27.10.2023; Одобрена: 18.12.2023; Принята: 25.12.2023.

Submitted: 27.10.2023; Approved: 18.12.2023; Accepted: 25.12.2023.

Научная статья

УДК 621.355

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30102>



С.Г. Обухов¹, Д.Ю. Давыдов¹ ✉, А.Л. Федянин²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия;

² Северский технологический институт – филиал федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Северск, Россия

✉ denisyudavydov@gmail.com

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Аннотация. Статья посвящена решению вопроса реализации математической модели аккумуляторных накопителей электроэнергии, обладающей универсальностью, высоким быстродействием и прочими качествами, необходимыми для выполнения анализа режимов работы и оптимизации в процессе разработки гибридных энергетических систем на базе возобновляемых источников энергии. Ввиду особенностей условий эксплуатации аккумуляторных батарей в составе гибридных систем, а также наличием специфических требований к их проектированию большинство предложенных моделей малоприспособлены для решения проектных задач. Разработанная модель основана на комбинации модифицированной модели Шеферда и кинетической модели электрохимических аккумуляторных батарей (KiBaM), что позволяет обеспечить возможность моделирования режимов работы аккумуляторов различных типов и алгоритмическую простоту идентификации параметров модели на основе данных технической спецификации. Проведенная экспериментальная апробация разработанной модели на основе серии вычислительных экспериментов показала, что модель адекватно отображает изменение основных параметров в динамических режимах и обладает высоким быстродействием, что позволяет ее использовать для решения задач имитационного моделирования режимов и оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения на основе ВИЭ.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, гибридные системы на основе ВИЭ, аккумуляторные накопители энергии, математическая модель, разрядные характеристики.

Для цитирования:

Обухов С.Г., Давыдов Д.Ю., Федянин А.Л. Математическая модель аккумуляторной батареи для проектирования гибридных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 55–68. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30102>



S.G. Obukhov¹, D.Yu. Davydov¹ ✉, A.L. Fedyanin²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia;

² Seversk Technological Institute – branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhi», Seversk, Russia

✉ denisyudavydov@gmail.com

MATHEMATICAL MODEL OF A BATTERY FOR THE DESIGN OF HYBRID POWER SYSTEMS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract. The article is devoted to solving the problem of implementing a mathematical model of battery energy storage that has versatility, high performance and other qualities necessary for performing analysis of operating modes and design optimization of hybrid renewable energy systems. Due to the specific operating conditions of hybrid systems, as well as the presence of specific requirements for their design, most of the proposed models were unsuitable for solving design problems. The proposed model is based on a combination of the modified Shepherd model and the kinetic battery model (KiBaM), which makes it possible to simulate the operating modes of various types of batteries with algorithmic simplicity of identifying model parameters based on technical specification data. The experimental testing of the developed model showed that the model provide adequate simulation results for the change in the main parameters of dynamic modes and has high performance, which allows it to be used to solve problems of simulation modeling of modes and optimization of the hybrid power supply system equipment based on renewable energy sources.

Keywords: renewable energy, hybrid renewable energy systems, battery energy storage, mathematical model, discharge characteristics.

Citation:

S.G. Obukhov, D.Yu. Davydov, A.L. Fedyanin, Mathematical model of a battery for the design of hybrid power systems based on renewable energy sources, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 55–68, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30102>

Введение. В настоящее время электроснабжение децентрализованных потребителей осуществляется преимущественно от дизельных электростанций, обеспечение бесперебойного функционирования которых требует серьезных финансовых вложений – только через «северный завоз» ежегодно транспортируется до 3.1 млн. тонн различных грузов, из которых 75% составляют топливно-энергетические ресурсы¹. Эффективным и востребованным способом замещения части потребляемого дизельного топлива является внедрение гибридных энергетических систем (ГС) на основе возобновляемых источников энергии [1], потенциал возможного применения которых составляет порядка 100 тыс. малых изолированных поселений, расположенных в районах Дальневосточного края и Арктических территориях РФ, а также на объектах инфраструктуры Северного морского пути, объектах Министерства обороны и Министерства природных ресурсов [1, 2].

Ввиду значительной вариативности возможных конфигураций ГС, первостепенной задачей их проектирования является выбор оптимального состава и параметров основного энергетического оборудования с целью максимизации технико-экономических показателей и обеспечения требуемой надежности системы [3]. В совокупности с этим, стохастический характер

¹ Федеральный закон "О северном завозе" от 04.08.2023 N 411-ФЗ.

возобновляемых источников энергии (ВИЭ), определяющий большие вариации энергетического баланса системы (в суточных и сезонных временных интервалах), обуславливает необходимость тщательного анализа рабочих режимов ГС для обоснованного выбора генерирующего оборудования [4].

Единственным способом решения обозначенной проблемы на этапе проектирования ГС является имитационное моделирование рассматриваемой энергосистемы, что определяет необходимость использования математических моделей всех ее компонентов. Адекватность математических моделей является определяющим фактором успешного выбора оборудования ГС, и в конечном итоге определяет ее технико-экономические характеристики.

Система накопления электрической энергии является неотъемлемым компонентом ГС, обеспечивающим существенное повышение коэффициента установленной мощности (КИУМ) ВИЭ-генерации, сокращение числа часов работы дизель-генераторных установок, что способствует снижению эксплуатационных издержек и затрат на топливо [5].

Наибольшее практическое применение в качестве систем накопления энергии получили аккумуляторные батареи (АКБ), ввиду наилучшего соответствия требованиям ГС по объемам и времени хранения энергии [6].

Накопитель энергии является основным инструментом управления энергетическим балансом в изолированной энергетической системе, и именно он во многом определяет рабочие режимы всей электростанции [7]. Соответственно, важной задачей является разработка математической модели АКБ, адекватно отражающей ее поведение в процессе эксплуатации в составе ГС.

Несмотря на большое число известных математических моделей АКБ, большинство из них малоприменимы для применения в составе общей имитационной модели ГС. Определяется это двумя основными факторами – особенностью условий эксплуатации АКБ в составе ГС и специфическими требованиями к их проектированию.

Проведенный анализ данных факторов позволяет сформулировать 4 важных требования к математической модели аккумуляторной батареи для решения задач проектирования и оптимизации состава оборудования ГС.

1) Универсальность. Вследствие большого разнообразия ГС по целевому назначению, а соответственно, и по требованиям к бесперебойности электроснабжения, степени автономности, уровню замещения топлива и т.п. в их составе могут использоваться АКБ разных типов (свинцово-кислотные, литий-ионные, никель-кадмиевые и др.), каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от конкретного применения. Соответственно, математическая модель АКБ должна обеспечивать возможность моделирования аккумуляторов разных типов.

2) Идентификация. В настоящее время на рынке представлено огромное количество АКБ разных типоразмеров. При этом их технические характеристики могут значительно различаться друг от друга не только в зависимости от химического состава, но и от технологии изготовления и производителя. Единственным достоверным способом определения параметров модели АКБ в данных условиях является использование данных технической спецификации, предоставляемой производителем АКБ.

3) Быстродействие. Решение задачи оптимизации ГС производится на основе сравнительного анализа технико-экономических характеристик множества возможных вариантов, полученных в результате имитационного моделирования ее эксплуатационных режимов на длительных временных интервалах. Соответственно, математические модели всех компонентов ГС должны быть не требовательны к вычислительным ресурсам и обеспечивать высокое быстродействие.

4) Учет ограничений. Основная функция накопителя энергии в составе ГС заключается в регулировании ее энергетического баланса, которая реализуется путем аккумуляции генерируемой установками ВИЭ электроэнергии в периоды ее избытка в системе, и возврата потребителю

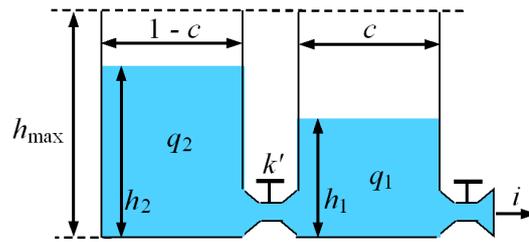


Рис. 1. Схематичное представление кинетической модели аккумуляторной батареи

Fig. 1. Schematic representation of battery kinetic model

в периоды дефицита. При анализе энергетического баланса необходимо учитывать, что полезно использовать всю доступную энергию на практике невозможно. В реальных АКБ любого типа существуют физические ограничения на величину доступной зарядно/разрядной мощности в зависимости от ее текущего состояния, обусловленные особенностью протекания электрохимических процессов. Кроме того, режимы работы АКБ во многом зависят от настроек контроллера заряда, который обеспечивает защиту АКБ от аварийных режимов и рекомендованные способы ее заряда/разряда.

Целью настоящих исследований является разработка математической модели аккумуляторной батареи для проектирования и оптимизации ГС с учетом обозначенных выше требований.

Теоретическая база

На основе выполненного анализа научных работ по теме исследования [8–13] предлагается использовать для достижения поставленной цели комбинированную модель АКБ на основе эмпирических моделей емкости и напряжения. В качестве модели емкости выбрана кинетическая модель батареи (КМАКБ) [14], модель напряжения построена на основе модифицированной модели Шеферда [15]. Основными критериями выбора данных моделей является их универсальность и применимость для решения задач моделирования режимов работы АКБ различных типов с возможностью определения параметров моделей на основании данных технической спецификации. Кроме того, эти модели хорошо апробированы, а их высокое качество подтверждается тем, что на основе модели Шеферда построена модель АКБ в популярном пакете моделирования MatLab/Simulink, а модель КМАКБ используется в известных программных комплексах проектирования и оптимизации ГС: HOMER, iHOGA и SAM [16].

1) Модель емкости

Концепция модели КМАКБ основана на представлении АКБ в виде гидравлической системы, состоящей из двух сообщающихся сосудов с сечениями c и $(1 - c)$, определяющих их вместимость, а соответственно, и величину зарядов: доступного q_1 , и химически связанного q_2 (рис. 1.). Резервуары соединены между собой клапаном, проводимость которого определяется константой k' , величина которой пропорциональна скорости химических реакций в АКБ. Полная емкость АКБ равна сумме зарядов в обоих резервуарах $q_{\max} = q_1 + q_2$, однако для непосредственного использования доступен только заряд в резервуаре 1.

Обозначив уровни заряда каждого резервуара через переменные h_1 и h_2 , авторами работы [14] получена следующая система уравнений, описывающих процессы в АКБ на каждом временном шаге Δt :

$$q_1 = q_{1.0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + \frac{(q_0 \cdot k \cdot c - i) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{k} - \frac{i \cdot c \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k};$$

$$q_2 = q_{2,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot (1 - c) \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t}) - \frac{i \cdot (1 - c) \cdot (k \cdot \Delta t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}{k}, \quad (1)$$

где $q_{1,0}$ и $q_{2,0}$ – количество заряда в доступном и связанном резервуарах, соответственно, при $t = 0$, и значит $q_0 = q_{1,0} + q_{2,0}$.

В полученной системе уравнений (1) используется новая переменная k , значение которой определяется по выражению:

$$k = \frac{k'}{c \cdot (1 - c)}. \quad (2)$$

Полная кинетическая модель АКБ включает всего три параметра: постоянная скорости k (1/ч), коэффициент емкости c и максимальная емкость аккумулятора q_{\max} (А·ч).

Оценка параметров модели выполняется на основе данных технической спецификации на конкретную модель АКБ или по экспериментально полученным разрядным характеристикам.

Согласно рекомендациям, приведенным в статье [14], оценку параметров следует производить по трем разрядным кривым для 1-го, 10-ти и 20-ти часового разрядного тока, что позволяет определить численные значения следующих функций:

$$F_{t_1, t_{10}} = \frac{q_{t=1}}{q_{t=10}}; \quad F_{t_1, t_{20}} = \frac{q_{t=1}}{q_{t=20}}, \quad (3)$$

где $q_{t=T}$ – разрядная емкость АКБ (А·ч) при времени разряда $t = T$ часов.

По полученным значениям разрядных функций с помощью следующего уравнения определяются два параметра модели c и k :

$$c = \frac{F_t \cdot (1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-k \cdot t_2}) \cdot t_1}{F_t \cdot (1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot t_2 - (1 - e^{-k \cdot t_2}) \cdot t_1 - k \cdot F_t \cdot t_1 \cdot t_2 + k \cdot t_1 \cdot t_2}. \quad (4)$$

Максимальная емкость АКБ определяется по уравнению:

$$q_{\max} = \frac{q_{t=T} \cdot [(1 - e^{-k \cdot t_1}) \cdot (1 - c) + k \cdot c \cdot t]}{k \cdot c \cdot t}. \quad (5)$$

При вычислении q_{\max} по уравнению (5) рекомендуется использовать значение разрядной емкости при низкой величине разрядного тока, например для 20-ти часового разряда.

Кинетическая модель АКБ определяет ограничения на максимальные токи заряда $I_{\text{char.max}}$ и разряда $I_{\text{dischar.max}}$ на каждом временном интервале имитационного моделирования. Значения максимальных зарядных/разрядных токов АКБ определяются из уравнений (1) путем подстановки в них следующих граничных условий: увеличение емкости АКБ в режиме заряда не должно превышать максимальных значений $q_1 = c \cdot q_{\max}$; снижение емкости АКБ в режиме разряда не может быть ниже нуля $q_1 = 0$. С учетом данных условий получены уравнения для определения максимальных значений токов:

$$I_{\text{char.max}} = \frac{-k \cdot c \cdot q_{\max} + k \cdot q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})};$$

$$I_{\text{dischar.max}} = \frac{k \cdot q_{1.0} \cdot e^{-k \cdot \Delta t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot \Delta t})}{1 - e^{-k \cdot \Delta t} + c \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot \Delta t})}, \quad (6)$$

где $q_{1.0}$, $q_{2.0}$, q_0 – величина доступной, связанной и общей емкости АКБ в начале временного интервала.

2) Модель напряжения

Модель напряжения основана на известной модели Шеферда [17], которая в обобщенном виде описывается следующим уравнением:

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{max}} - q} \cdot q + A \cdot e^{-B \cdot (q_{\text{max}} - q)}, \quad (7)$$

где V_{batt} – напряжение на клеммах АКБ в режиме разряда; i – ток через аккумулятор; R – внутреннее сопротивление АКБ; q_{max} , q – полная и израсходованная емкость АКБ, соответственно; E_0 , K , B и A – эмпирические константы, которые определяются по разрядным характеристикам АКБ из технической спецификации.

В классическом виде (7) модель Шеферда отображает только процессы разряда АКБ постоянным током, что существенно ограничивает возможность ее практического применения. Более удобной является модифицированная версия модели, предложенная авторами работы [15], которая описывается следующим уравнением:

$$V_{\text{batt}} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{max}} - q} \cdot q - K \cdot \frac{q_{\text{max}}}{q_{\text{max}} - q} \cdot i^* + A \cdot e^{-B \cdot (q_{\text{max}} - q)}, \quad (8)$$

где i^* – «фильтрованный» ток, отображающий инерционную реакцию напряжения АКБ на скачкообразное изменение тока.

Детальное описание модифицированной модели Шеферда, на которой основана предлагаемая модель АКБ, приведено в работе [15] и справочной системе MatLab/Simulink. Данная модель напряжения позволяет описывать как статические, так и динамические характеристики АКБ разных типов, для идентификации ее параметров требуется только разрядная характеристика при малом токе разряда из данных технической спецификации.

3) Модуль учета ограничений

Важной функцией математической модели АКБ, предназначенной для эксплуатации в составе ГС, является адекватное отображение ее способности к приему/отдаче мощности. Доступная мощность АКБ зависит не только от физических ограничений, накладываемых КМАКБ моделью, но и во многом определяется настройками контроллера, под управлением которого работает АКБ. Настройки контроллера устанавливаются на основании данных технической спецификации, в которых определены следующие параметры АКБ: максимально допустимые токи заряда $I_{\text{data.char.max}}$ и разряда $I_{\text{data.dischar.max}}$, максимальное напряжение заряда $V_{\text{data.max}}$ и минимальное напряжение разряда $V_{\text{data.min}}$. Настройки контроллера обеспечивают защиту АКБ от аварийных режимов: перегрузок по току, перенапряжения и глубокого разряда, что в конечном итоге позволяет максимально эффективно использовать ее эксплуатационный ресурс.

Расчет доступной мощности АКБ производится в модуле учета ограничений, источником входного сигнала которого является величина располагаемой электрической мощности P_{set} , которая рассчитывается на каждом временном шаге имитационного моделирования ГС. Данная мощность определяется как разность между мощностями, генерируемыми установками возобновляемой энергетики P_{RES} и гарантированным источником питания P_{DGS} , в качестве которого

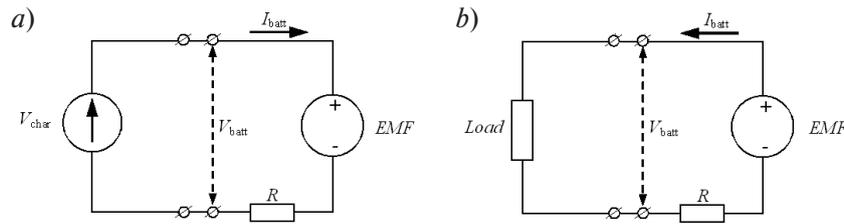


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения аккумуляторной батареи: а) – в режиме заряда; б) – в режиме разряда
 Fig. 2. Equivalent electrical circuit of a battery: a) – charge mode; b) – discharge mode

чаще всего используется дизель-генераторная установка, и мощностью, потребляемой нагрузкой P_{load} :

$$P_{set} = (R_{RES} + R_{DGS} - P_{load}) \cdot \eta_{char} \quad \text{в режиме заряда;} \quad (9)$$

$$P_{set} = (R_{RES} + R_{DGS} - P_{load}) \cdot \frac{1}{\eta_{dischar}} \quad \text{в режиме разряда,}$$

где η_{char} , $\eta_{dischar}$ – эффективность преобразования энергии АКБ в режимах заряда и разряда, соответственно.

На рис. 2 показаны эквивалентные схемы замещения, на основе которых устанавливаются ограничения на доступную мощность АКБ. В данных схемах АКБ представлена в виде источника напряжения с величиной, равной электродвижущей силе батареи (ElectroMotive Force – EMF), и внутренним сопротивлением R . Режим избытка располагаемой мощности ГС эквивалентен заряду АКБ от внешнего источника V_{char} , режим дефицита мощности равноценен разряду АКБ на внешнюю нагрузку $Load$.

Согласно уравнению Шеферда (7) электродвижущая сила АКБ определяется по уравнению:

$$EMF = E_0 - K \cdot \frac{q_{max}}{q_{max} - q} \cdot q + A \cdot e^{-B \cdot (q_{max} - q)}. \quad (10)$$

Согласно схеме замещения рис. 2а в режиме заряда только часть располагаемой мощности P_{set} непосредственно идет на заряд АКБ ($EMF \cdot I_{char}$), так как часть мощности теряется на внутреннем сопротивлении ($I_{char}^2 \cdot R$).

Решение квадратного уравнения, составленного из баланса мощностей, позволяет найти значения напряжения V_{char} и тока I_{char} внешнего источника в режиме заряда:

$$V_{char} = \frac{EMF + \sqrt{EMF^2 + 4 \cdot R \cdot |P_{set}|}}{2}; \quad (11)$$

$$I_{char} = \frac{EMF - \sqrt{EMF^2 + 4 \cdot R \cdot |P_{set}|}}{2 \cdot R}.$$

С учетом физического ограничения мощности АКБ, определяемого уравнением (6), и ограничением максимального тока, установленного в контроллере, значение тока АКБ в режиме заряда должно удовлетворять следующему условию:



Рис. 3. Функциональная схема модели аккумуляторной батареи

Fig. 3. Functional flowchart for battery model

$$I_{batt} \leq \min \{ I_{char.max}, I_{data_char_max} \}. \quad (12)$$

Кроме того, для защиты АКБ от перезаряда величина зарядного тока не должна превышать следующего значения:

$$I_{batt} \leq \frac{V_{data_max} - EMF}{R}. \quad (13)$$

Аналогично определяются ограничения тока АКБ в режиме разряда:

$$I_{batt} \leq \min \left\{ I_{dischar.max}, I_{data_dischar_max}, \frac{EMF - V_{data_min}}{R} \right\}. \quad (14)$$

4) Описание общей функциональной схемы модели

Упрощенная функциональная схема разработанной модели АКБ показана на рис. 3.

В модуле учета ограничений на каждом шаге имитационного моделирования режимов ГС по уравнениям (9)–(14) определяется значение тока, протекающего через АКБ. В модели емкости по уравнениям (1) рассчитываются величина израсходованного заряда q и величина остаточной емкости, или степень заряда (State of Charge – SOC):

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \int_0^t \frac{I_{batt}}{q_{max}} dt. \quad (15)$$

Величина напряжения АКБ определяется в модели напряжения по уравнению (8). В данной работе не рассматриваются модели деградации и температурные зависимости, которые опционально могут быть включены в предлагаемую модель.

Результаты и обсуждение

Апробация разработанной модели проведена путем моделирования характеристик и режимов литий-железо-фосфатной АКБ, номинальной емкостью 100 Ач, выпускаемой под торговой маркой ESS-5120 [18]. АКБ данного типа выдерживают до 6000 зарядно-разрядных циклов при глубине разряда до 80%, благодаря чему широко применяются в качестве накопителей энергии в составе ГС. Основные данные технической спецификации АКБ ESS-5120 приведены в табл. 1, разрядные характеристики показаны на рис. 4.

На рис. 4а показаны паспортные графики разряда АКБ ESS-5120 разными токами, которые использовались для идентификации параметров математической модели. Маркерами на рис. 4б отображены экспериментально полученные точки разрядных кривых, а линиями – разрядные характеристики, построенные по результатам моделирования.

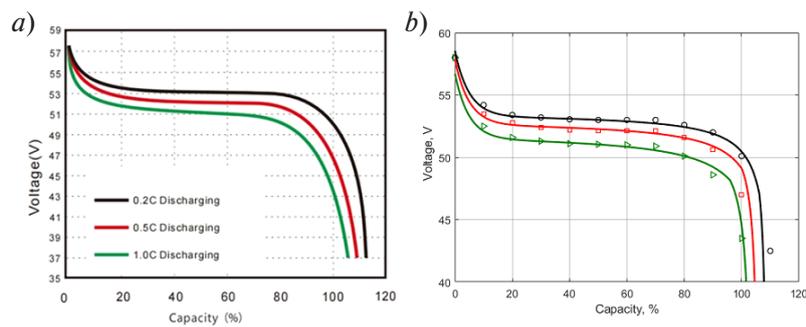


Рис. 4. Разрядные характеристики аккумулятора ESS-5120:

a – из паспорта технической спецификации; *b* – по результатам моделирования

Fig. 4. Discharge characteristics of ESS-5120 battery: *a* – datasheet characteristics; *b* – simulation results

Таблица 1

Данные технической спецификации аккумуляторной батареи ESS-5120

Table 1

ESS-5120 battery data sheet

Параметр	Значение
Химический состав ячеек	LiFePO4
Номинальное напряжение, В	51,2
Номинальная емкость, Ач	100
Максимальный ток заряда, А	100
Напряжение отключение заряда, В	56
Максимальный ток разряда, А	100
Напряжение отключение разряда, В	44,8

Представленные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемая модель адекватно отображает разрядные характеристики АКБ с приемлемой точностью.

Динамические свойства модели оценивались путем моделирования режимов АКБ при работе по типовому профилю энергетических систем на основе ВИЭ, предложенному в работе [19].

На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования рабочих режимов АКБ при эксплуатации по данному нагрузочному профилю на суточном временном интервале.

Полученные в ходе проведенных вычислительных экспериментов результаты показывают, что модель адекватно отображает изменение основных параметров АКБ в динамических режимах и обладает высоким быстродействием, что позволяет ее использовать для решения задач имитационного моделирования режимов и оптимизации состава оборудования ГС.

Для проверки способности модели учитывать эксплуатационные ограничения были проведены вычислительные эксперименты, имитирующие разнообразные возможные режимы ее работы. На рис. 6 представлены расчетные зависимости изменения параметров АКБ, работающей в режиме заряда. В данных вычислительных экспериментах показана реакция АКБ на прием зарядной мощности в зависимости от уставок контроллера на величину максимального напряжения заряда V_{data_max} . В проведенных экспериментах в 1 час модельного времени происходит ступенчатое увеличение располагаемой в системе мощности P_{set} с 0 до 2000 Вт (применяются общепринятые соглашения: в режиме заряда – мощность отрицательная, в режиме разряда – положительная). Результаты моделирования показывают, что установленная величина V_{data_max}

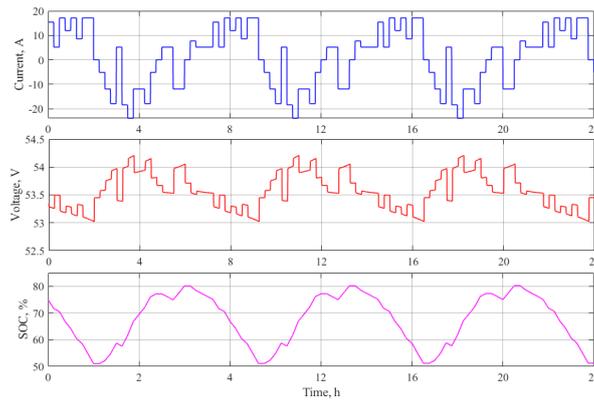


Рис. 5. Результаты моделирования режимов батареи ESS-5120 при эксплуатации по профилю автономных энергетических систем на основе ВИЭ
 Fig. 5. Simulation results of ESS-5120 battery modes during operation in autonomous energy systems based on renewable energy source

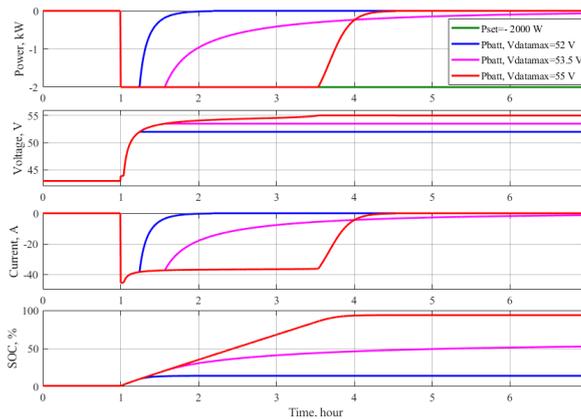


Рис. 6. Изменения параметров батареи ESS-5120 в режиме заряда при разных уставках на величину максимального напряжения заряда
 Fig. 6. Changes in the ESS-5120 battery parameters in charge mode at different settings by the value of the maximum charge voltage

во многом определяет время и степень заряда АКБ, и учет данного параметра чрезвычайно важен при моделировании.

На рис. 7 представлены расчетные зависимости изменения параметров АКБ, работающей в режиме разряда. В данных экспериментах демонстрируется способность модели к учету физических ограничений разрядной мощности, определяемых в модели емкости по току $I_{\text{dischar.max}}$, максимально допустимого тока разряда $I_{\text{data_dischar_max}}$ и минимального напряжения разряда $V_{\text{data_min}}$. В проведенных вычислительных экспериментах величина уставки минимального напряжения для всех опытов принята одинаковой и равной $V_{\text{data_min}} = 44,8 \text{ В}$, значение максимально допустимого тока разряда принято равным $I_{\text{data_dischar_max}} = 100 \text{ А}$. Отработку моделью установленных ограничений поясним на примере эксперимента с величиной располагаемой мощности $P_{\text{set}} = 6000 \text{ Вт}$. В данном эксперименте величина P_{set} скачкообразно изменяется от 0 до 6000 Вт в момент модельного времени $t = 1$ час. Из результатов моделирования видно, что на временном интервале от 1 до 2 часов АКБ не может обеспечить всю необходимую разрядную мощность (верхний график) так

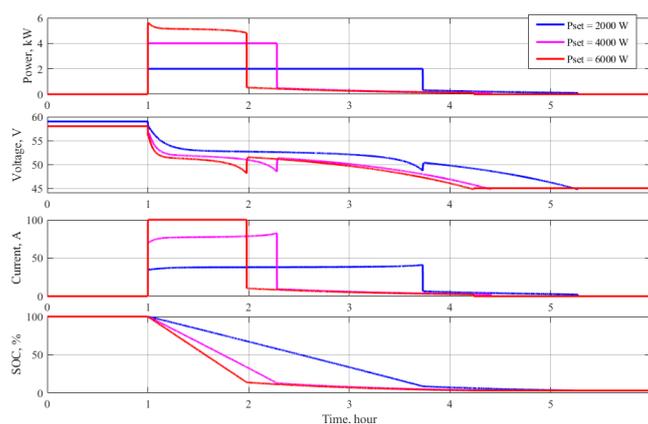


Рис. 7. Изменения параметров батареи ESS-5120 в режиме разряда при разных значениях разрядной мощности
 Fig. 7. Changes in the ESS-5120 battery parameters in the discharge mode at different discharge power values

как ее разрядный ток ограничен величиной 100 А. В момент модельного времени около 2 часов происходит уменьшение остаточного заряда АКБ до величины 15% от номинального, что приводит к ограничению величины разрядного тока до значений, определяемых в модели емкости. В момент времени 4,2 часа напряжение АКБ снижается до установленного минимального порога в 44,8 В – разряд АКБ прекращается.

Отметим, что современные контроллеры АКБ, которые применяются в составе ГС, производят переключение между режимами заряда и разряда не по величине напряжения, а по расчетным значениям остаточного заряда АКБ. Достоверное определение значений SOC в реальных условиях эксплуатации АКБ (особенно литий-ионных) является достаточно сложной технической задачей, для решения которой используют разнообразные приемы, одним из которых является широко применяемый метод прямого счета ампер-часов. Разработка эффективных алгоритмов управления режимами ГС является отдельным направлением исследований, и в рамках данной работы не рассматривается. Однако, предложенная модель позволяет исследовать разнообразные алгоритмы управления ее эксплуатационными режимами, что позволяет ее использовать не только для решения задач оптимизации состава оборудования ГС, но и в других смежных областях, связанных с электрохимическими накопителями энергии.

Заключение

В результате проведенных исследований разработана математическая модель АКБ, адекватно отражающая ее поведение в процессе эксплуатации в составе гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии. Достоинством предложенной модели является учет физических ограничений на доступную мощность, что позволяет моделировать режимы АКБ с учетом предустановленных настроек контроллера заряда, обеспечивающих защиту АКБ от аварийных режимов и заданных условий эксплуатации. Для идентификации параметров модели достаточно данных технической спецификации, предоставляемой производителем, что выгодно отличает ее от большинства, представленных в литературных источниках, математических моделей АКБ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Люкайтис В.Ю., Глушков С.Ю. Автономные энергокомплексы, гибридные конструкции с применением возобновляемых источников энергии // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. 2019. Т. 2, Вып. 2. – С. 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120

- [2] Сайт Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Режим доступа: <https://energy.hse.ru/distributed> (дата обращения: 06.05.2023).
- [3] Renewables 2022 Analysis and forecast to 2027. IEA Publications International Energy Agency. Режим доступа: www.iea.org (дата обращения: 06.05.2023).
- [4] **Обухов С.Г., Ибрагим А.** Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2020. Т. 20, № 2. С. 64–76. DOI: 10.14529/power200206
- [5] **Alsaidan I., Khodaei A., Gao W.** A Comprehensive Battery Energy Storage Optimal Sizing Model for Microgrid Applications // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. 33 (4). pp. 3968–3980. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2769639
- [6] **Ogunniyi E.O., Pienaar H.** Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications // 2017 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE). Cape Town, South Africa, 2017, pp. 233–239. DOI: 10.23919/DUE.2017.7931849
- [7] **Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г.** Анализ режимов работы накопителей энергии в автономных гибридных электростанциях с возобновляемыми источниками энергии // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). 2018. № 13–15. С. 55–67. DOI: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067
- [8] **Tamilselvi S., Gunasundari S., Karuppiah N., Razak RK. A., Madhusudan S., Nagarajan V.M., Sathish T., Shamim M.Z.M., Saleel C.A., Afzal A.A.** Review on Battery Modelling Techniques // Sustainability. 2021. 13. 10042. DOI: 10.3390/su131810042
- [9] **Song X., Lu Y., Wang F., Zhao X., Chen H.** A coupled electro-chemo-mechanical model for all-solid-state thin film Li-ion batteries: The effects of bending on battery performances // Journal of Power Sources. 2022. Vol. 452. 227803. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227803
- [10] **Доброго К.В., Бладыко Ю.В.** Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64. № 1. С. 27–39. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39
- [11] **Wang Y., Tian J., Sun Z., Wang L., Xu R., Li M., Chen Z.** A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 131. 110015. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110015
- [12] **Zhang S., Guo X., Zhang X.** Modeling of back-propagation neural network based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries with consideration of capacity attenuation // Adv. Electr. Comput. Eng. 2019. 19. pp. 3–10.
- [13] **Kashkooli A.G., Fathiannasab H., Mao Z., Chen Z.** Application of artificial intelligence to state-of-charge and state-of-health estimation of calendar-aged lithium-ion pouch cells // J. Electrochem. Soc. 2019. 166. A605. DOI: 10.1149/2.0411904jes
- [14] **Manwell J.F., McGowan J.G.** Lead acid battery storage model for hybrid energy systems // Solar Energy. 1993. Vol. 50. Iss. 5. pp. 399–405. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90060-2
- [15] **Tremblay O., Dessaint L.-A.** Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // World Electr. Veh. J. 2009. 3. pp. 289–298. DOI: 10.3390/wevj3020289
- [16] **Kavadias K.A., Triantafyllou P.** Hybrid Renewable Energy Systems' Optimisation. A Review and Extended Comparison of the Most-Used Software Tools // Energies. 2021. 14. 8268. DOI: 10.3390/en14248268
- [17] **Shepherd C.M.** Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge / C.M. Shepherd // Journal of Electrochemical Society. 1965. Vol. 112, Iss. 7. Pp. 657–664.
- [18] EVLithium Режим доступа: www.evlithium.com/ (дата обращения: 15.04.2023).
- [19] **Bindner H., Cronin T., Lundsage, P., Manwell J. F., Abdulwahid U., Baring-Gould I.** Lifetime modelling of lead acid batteries. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; No. 1515 (EN), 2005.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОБУХОВ Сергей Геннадьевич – профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, д-р техн. наук.

E-mail: serob99@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

ДАВЫДОВ Денис Юрьевич – старший преподаватель, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, канд. техн. наук.

E-mail: denisyudavydov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

ФЕДЯНИН Александр Леонидович – доцент, заведующий кафедрой, Северский технологический институт – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», канд. техн. наук.

E-mail: alfedyanin82@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7658-1249>

REFERENCES

- [1] **V.Yu. Lukaitis, S.Yu. Glushkov**, Autonomous power generation facilities, hybrid structures comprising renewable energy sources, Power and Autonomous equipment, 2 (2) (2019) 111–120. DOI: 10.32464/2618-8716-2019-2-2-111-120
- [2] National Research University Higher School of Economics, <https://energy.hse.ru/distributed>. Accessed May 06, 2023.
- [3] Renewables 2022 Analysis and forecast to 2027, IEA Publications International Energy Agency, www.iea.org. Accessed May 06, 2023.
- [4] **S.G. Obukhov, A. Ibragim**, Methodology of optimum unit commitment of energy systems with renewable energy sources, Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering, 20 (2) (2020) 64–76. DOI: 10.14529/power200206
- [5] **I. Alsaidan, A. Khodaei, W. Gao**, A Comprehensive Battery Energy Storage Optimal Sizing Model for Microgrid Applications, IEEE Transactions on Power Systems, 33 (4) (2018) 3968–3980. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2769639
- [6] **E.O. Ogunniyi, H. Pienaar**, Overview of battery energy storage system advancement for renewable (photovoltaic) energy applications, International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE), Cape Town, South Africa, (2017) 233–239. DOI: 10.23919/DUE.2017.7931849
- [7] **S.G. Obukhov, I.A. Plotnikov, V.G. Masolov**, The analysis of operation modes of energy stores in autonomous hybrid power plants with renewable energy resources, Alternative Energy and Ecology (ISJAE), (13-15) (2018) 55–67. DOI: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067
- [8] **S. Tamilselvi, S. Gunasundari, N. Karuppiah, R.K. A Razak, S. Madhusudan, V.M. Nagarajan, T. Sathish, M.Z.M. Shamim, C.A. Saleel, A. Afzal**, A Review on Battery Modelling Techniques, Sustainability, 13 (18) (2021) 10042. DOI: 10.3390/su131810042
- [9] **X. Song, Y. Lu, F. Wang, X. Zhao, H. Chen**, A coupled electro-chemo-mechanical model for all-solid-state thin film Li-ion batteries: The effects of bending on battery performances, Journal of Power Sources, 452 (2020) 227803. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227803
- [10] **K.V. Dobrego, V.V. Bladyko**, Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters, ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations, 64 (1) (2021) 27–39. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39

- [11] **Y. Wang, J. Tian, Z. Sun, L. Wang, R. Xu, M. Li, Z. Chen**, A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131 (2020) 110015. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110015
- [12] **S. Zhang, X. Guo, X. Zhang**, Modeling of back-propagation neural network based state-of-charge estimation for lithium-ion batteries with consideration of capacity attenuation, *Adv. Electr. Comput. Eng*, 19 (2019) 3–10.
- [13] **A.G. Kashkooli, H. Fathiannasab, Z. Mao, Z. Chen**, Application of artificial intelligence to state-of-charge and state-of-health estimation of calendar-aged lithium-ion pouch cells, *J. Electrochem. Soc*, 166 (2019) A605. DOI: 10.1149/2.0411904jes
- [14] **J.F. Manwell, J.G. McGowan**, Lead acid battery storage model for hybrid energy systems, *Solar Energy*, 50 (5) (1993) 399–405. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90060-2
- [15] **O. Tremblay, L.-A. Dessain**, Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications, *World Electr. Veh. J.*, 3 (2009) 289–298. DOI: 10.3390/wevj3020289
- [16] **K.A. Kavadias, P. Triantafyllou**, Hybrid Renewable Energy Systems' Optimisation. A Review and Extended Comparison of the Most-Used Software Tools, *Energies*, 14 (2021) 8268. DOI: 10.3390/en14248268
- [17] **C.M. Shepherd**, Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge, *Journal of Electrochemical Society*, 122 (7) (1965) 657–664.
- [18] EVLithium, www.evlithium.com. Accessed May 06, 2023.
- [19] **H. Bindner, T. Cronin, P. Lundsager, J.F. Manwell, U. Abdulwahid, I. Baring-Gould**, Lifetime modelling of lead acid batteries, Denmark, Forskningscenter Risoe. Risoe-R, No. 1515 (EN) (2005).

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey G. OBUKHOV – *National Research Tomsk Polytechnic University*.
E-mail: serob99@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7177-4036>

Denis Yu. DAVYDOV – *National Research Tomsk Polytechnic University*.
E-mail: denisyudavydov@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2998-6304>

Alexander L. FEDYANIN – *Seversk Technological Institute - branch of State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Nuclear University «MEPhI»*.
E-mail: alfedyanin82@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7658-1249>

Поступила: 09.11.2023; Одобрена: 05.12.2023; Принята: 05.12.2023.
Submitted: 09.11.2023; Approved: 05.12.2023; Accepted: 05.12.2023.

Научная статья

УДК 621.039

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103>



И.А. Прохоров ✉, *И.Е. Иванов*, *И.Ф. Моисеев*, *В.Е. Дружинин*

АО "ВНИИАЭС", Москва, Россия

✉ prokhorov.igor2202@mail.ru

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ОПЫТОВ ПО ВЗВЕШИВАНИЮ УЧАСТКА СТЕРЖНЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРОВОГО КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОСТИ НА РЕАКТОРЕ РБМК

Аннотация. Обработка опыта по определению эффективности (взвешиванию) стержней автоматического регулятора является одним из этапов оценки парового коэффициента реактивности на реакторных установках РБМК-1000. Паровой коэффициент реактивности является одной из важнейших нейтронно-физических характеристик, определяющих характер обратных связей в реакторе и безопасность при проектных и запроектных авариях. В статье исследуются неопределенности обработки опыта по взвешиванию стержней автоматического регулятора при измерении парового коэффициента реактивности методом внесения возмущений в расход питательной воды. Рассмотрены существующие способы обработки опыта по взвешиванию стержней автоматического регулятора, применяемые на АЭС. На основании исследования результатов обработки измерений парового коэффициента реактивности на Курской, Смоленской и Ленинградской АЭС сделан вывод о предпочтительном варианте обработки опыта по взвешиванию стержней автоматического регулятора. Приведена оценка инструментальной погрешности измерения реактивности на энергетическом уровне мощности.

Ключевые слова: РБМК-1000, реактивность, паровой коэффициент реактивности, сглаживающий сплайн, стандартная неопределенность.

Для цитирования:

Прохоров И.А., Иванов И.Е., Моисеев И.Ф., Дружинин В.Е. Неопределенности обработки опытов по взвешиванию участка стержней автоматического регулятора при измерении парового коэффициента реактивности на реакторе РБМК // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 69–81. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103>



I.A. Prokhorov ✉, I.E. Ivanov, I.F. Moiseev, V.E. Druzhinin

JSK "VNIIAES", Moscow, Russia

✉ prokhorov.igor2202@mail.ru

UNCERTAINTIES IN PROCESSING THE EXPERIMENT TO DETERMINE THE EFFICIENCY OF THE SECTION OF THE AUTOMATIC REGULATOR RODS WHEN MEASURING THE VOID COEFFICIENT OF REACTIVITY AT THE RBMK REACTOR

Abstract. The article discusses the uncertainties in determining the efficiency of the automatic regulator rods when measuring the void reactivity coefficient by the method of perturbation of feed water flow at the RBMK-1000 reactor. The existing methods for assessing the effectiveness of a rod are considered. Based on the study of the results of processing measurements of the void reactivity coefficient at the Kursk, Smolensk and Leningrad nuclear power plants, a conclusion is made about the preferred option for processing the experience of weighing the rods of an automatic regulator. The estimation of the instrumental error of measuring reactivity at the power energy level is given.

Keywords: RBMK-1000, reactivity, void coefficient of reactivity, smoothing spline, standard uncertainty.

Citation:

I.A. Prokhorov, I.E. Ivanov, I.F. Moiseev, V.E. Druzhinin, Uncertainties in processing the experiment to determine the efficiency of the section of the automatic regulator rods when measuring the void coefficient of reactivity at the RBMK reactor, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 69–81, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30103>

Введение. Паровой коэффициент реактивности (ПКР) является одной из наиболее важных нейтронно-физических характеристик (НФХ) реакторов РБМК-1000 [1–3]. Он определяется соотношением: $\alpha_{\varphi} = d\rho/d\varphi$, где $d\rho$ – малое по величине изменение реактивности, вызванное малым изменением паросодержания $d\varphi$. Значения ПКР на реакторах РБМК-1000 не должны выходить за границы эксплуатационного диапазона ($0 - 1 \beta_{эф}$). Измерения ПКР выполняется путем проведения серии специальных опытов с возмущением расхода питательной воды (РПВ) и опыта по определению эффективности участка стержней автоматического регулирования (АР)¹. В случае положительного ПКР увеличение расхода питательной воды через реактор приводит к снижению величины паросодержания, вводу отрицательной реактивности и отработке (частичному извлечению) стержней АР. Обратная ситуация наблюдается при снижении расхода питательной воды: паросодержание увеличивается, что приводит к вводу положительной реактивности и вводу стержней АР в активную зону реактора [4].

Существующий вариант методики проведения и обработки измерений ПКР имеет ряд неопределенностей, таких как:

– неопределенность, связанная с экспертным выбором параметров обработки результатов, таких как расстановка временных меток для срезов исходных данных, на которых выполняются расчеты паросодержания;

¹ РД ЭО 1.1.2.99.1423-2018 «Комплексная методика определения физических и динамических характеристик реакторов РБМК-1000». М. 2018 (далее Методика).

- неопределенность, связанная с применением цифровой фильтрации (сглаживания) результатов измерений технологических параметров (ТП);
- неопределенность в оценке эффективности участка стержней АР;
- неопределенность использования исходных данных, зарегистрированных с различной частотой;

Эти неопределенности могут привести к снижению достоверности оценки величины ПКР – характеристики, в значительной мере определяющей решения по изменению состава загрузки активных зон реакторов РБМК-1000.

Обработка результатов измерений технологических параметров (ТП) и вычисление значения ПКР осуществляется с использованием уравнений баланса реактивности при проведении серии опытов с возмущением РПВ и опыта по определению эффективности участка стержней АР.

Расчёт ПКР на АЭС с реакторами РБМК-1000 при использовании средств автоматизированной обработки результатов измерений состоит из трёх этапов:

- обработка опыта по определению эффективности участка стержней АР и вычисление значения быстрого мощностного коэффициента реактивности (БМКР);
- обработка опытов с возмущением расходов питательной воды по половинам реактора, где с использованием теплофизических параметров (энтальпия, температура питательной воды, давление в барабане-сепараторе и ряд других) и данных, полученных на первом этапе обработки, вычисляются оценки парового коэффициента реактивности в отдельных опытах;
- итоговая оценка ПКР по методу наименьших квадратов.

Настоящая работа посвящена исследованию неопределенностей измерения ПКР на АЭС с реакторами РБМК, связанных с обработкой опыта по взвешиванию участка стержней АР [5].

Подходы к обработке опыта по взвешиванию участка стержней АР

Характерный вид графика изменения реактивности и мощности при определении эффективности участка стержней АР приведен на рис. 1. На нем следует отметить следующие три особые точки:

- T_0 – момент времени начала движения стержней АР;
- T_1 – момент времени, соответствующий установившемуся значению отклонения нейтронной мощности от исходной;
- T_t – момент времени, соответствующий минимуму реактивности.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}\Delta W_t &= W_t - W_0; \\ \Delta W_1 &= W_1 - W_0,\end{aligned}$$

где W_0 , W_1 , W_t значения нейтронной мощности в моменты времени T_0 , T_1 , T_t соответственно.

Уравнения баланса реактивности в точках T_t и T_1 имеют вид:

$$\begin{cases} \rho_n + \rho_{взв} + \alpha_w \Delta W_t f = \rho_{изм} \\ \rho_n + \rho_{взв} + \alpha_w \Delta W_1 = \rho_{ост} \end{cases}, \quad (1)$$

где:

- ρ_n , $\rho_{ост}$, $\rho_{изм}$ – значения реактивности, измеренной в моменты времени T_0 , T_1 и T_t соответственно;
- $\rho_{взв}$ – реактивность, введенная при погружении в а.з. участка стержней АР;
- f – относительное изменение тепловой мощности по отношению к нейтронной за время ввода стержней T_t .

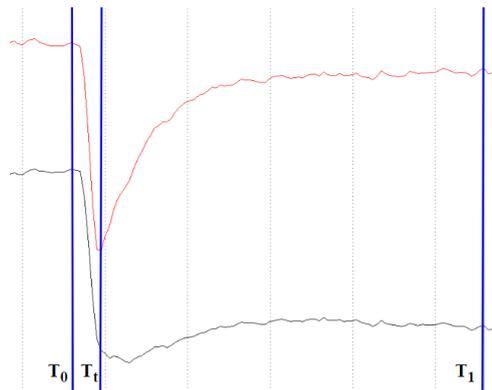


Рис. 1. Характерный вид кривых изменения мощности (черный) и реактивности (красный) в опыте по взвешиванию участка стержней АР

Fig. 1. Typical appearance of the power (black) and reactivity (red) change curves in the experiment to determine the efficiency of automatic regulation rods

Результатом обработки опыта по взвешиванию является вычисление из системы уравнений (1) значения реактивности $\rho_{\text{взв}}$:

$$\rho_{\text{взв}} = \frac{\rho_{\text{изм}}}{1 - \frac{\Delta W_t f}{\Delta W_1}} \quad (2)$$

Изменение реактивности за счет изменения паросодержания в опытах с возмущением РПВ определяется из уравнения баланса реактивности для каждого опыта:

$$\alpha_{\phi} \cdot \Delta \rho_{\text{взв},l} + \alpha_z \cdot \Delta W_l + \rho_{\text{сyz},l} = \rho_{\text{к},l} - \rho_{\text{н},l} \quad (3)$$

где:

- l – номер опыта;
- $\rho_{\text{взв},l}$ – изменение паросодержания, взвешенное с квадратом плотности потока нейтронов в реакторе;
- $\rho_{\text{сyz},l}$ – изменение реактивности за счет перемещения стержней АР. Вычисляется с учетом перемещения стержней АР в опыте с возмущением РПВ и в опыте по «взвешиванию» участка стержней АР на основе $\rho_{\text{взв}}$;
- ΔW_l – изменение мощности в зоне нечувствительности АР;
- $\rho_{\text{к},l}, \rho_{\text{н},l}$ – значения реактивности реактора в момент расчёта паросодержания в возмущенном состоянии и непосредственно перед началом изменения мощности реактора, вызванного возмущением РПВ;
- α_z – доплеровская составляющая быстрого мощностного коэффициента реактивности (заданная величина, равная $-3,3 \cdot 10^{-4} \beta/\text{МВт}$, оцененная по результатам измерений).

Таким образом, оценка $\rho_{\text{взв}}$ влияет на $\rho_{\text{сyz},l}$ (3), а, следовательно, и на величину ПКР по совокупности опытов с возмущением РПВ.

При регистрации ТП, необходимых для расчётной обработки измерений ПКР, осуществляется их запись в файл с тактом 500 мс. Однако в ряде случаев параметры «мощность» и «положение стержней АР» записываются в файл с более высокой частотой. Такой файл формируется по апертурному принципу (запись набора параметров осуществляется, когда изменился хотя бы один из них).

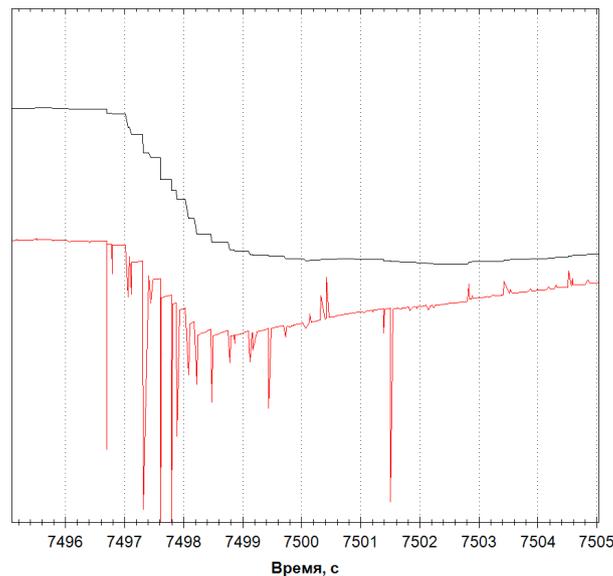


Рис. 2. Характерный вид кривых мощности (черный) и реактивности (красный) в опыте по «взвешиванию» ст. АР. Параметр мощность взят из файла с высокой частотой регистрации ТП

Fig. 2. Typical appearance of the power (black) and reactivity (red) curves in the experiment to determine the effectiveness of automatic regulation rods. The power parameter is taken from a file with a high recording frequency

Стремление использовать файл с высокой частотой регистрации было продиктовано желанием как можно более детально описать поведение мощности в процессе погружения стержней АР в опыте определению $\rho_{\text{взв}}$, весь процесс погружения стержней занимает 1,5–2 с. За этот промежуток времени в файле с таким дискретизацией 500 мс будет отражено 2–3 записи, что, на первый взгляд, кажется недостаточным для описания поведения кривой мощности в опыте с погружением стержней АР (рис. 1).

Однако прямое использование файла с высокой частотой регистрации ТП для определения $\rho_{\text{взв}}$ приводит к неприемлемым результатам ввиду особенностей решения уравнений точечной кинетики в случае, когда функция параметра мощность носит ступенчатый характер (рис. 2). К ступенчатому характеру кривой мощности приводит избыточная дискретизация, а ступенчатый вид исходного параметра с изменением значений на очень коротких временных интервалах дискретизации (среднее значение около 0.05 с) предопределяет оценку реактивности в виде набора отрицательных выбросов, вносящих существенную погрешность в определение $\rho_{\text{взв}}$ [6, 7].

Известно, что при погружении стержней АР кривые мощности и реактивности на участке погружения стержней АР носят гладкий монотонный характер (рис. 1). Отсюда ясно, что прежде, чем подвергать информацию по мощности обработке в соответствии с алгоритмом точечной кинетики [8, 9] необходимо избавиться от ступенчатого вида записи сигнала мощности. Иными словами, необходимо аппроксимировать исходную ступенчатую зависимость какой-либо функцией, достаточно близкой к исходной, при этом функция должна иметь четкий минимум производной.

В качестве модели аппроксимации исходной ступенчатой зависимости по критерию минимума среднеквадратичного отклонения аппроксимирующей функции от зарегистрированных данных был выбран сглаживающий сплайн [10–12].

Сглаживающий кубический сплайн – гладкая функция $s(t)$, которая представляет собой на каждом интервале $[t_i; t_{i+1})$ кубический многочлен вида:

$$s_i(t) = a_i(t-t_i)^3 + b_i(t-t_i)^2 + c_i(t-t_i) + d_i. \quad (4)$$

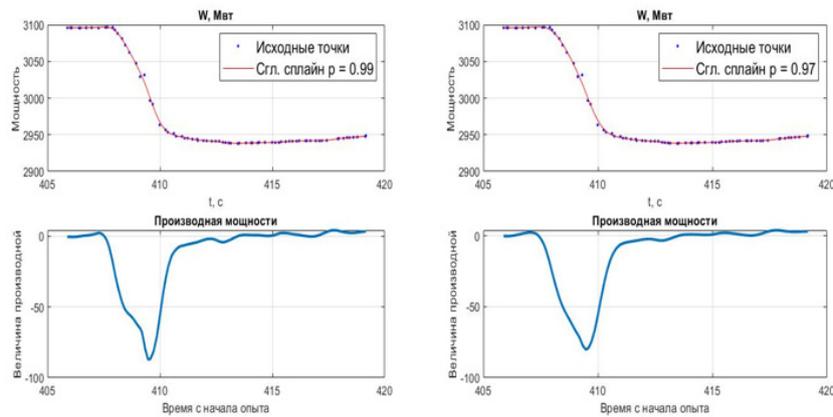


Рис. 3. Вид функций нейтронной мощности и производной от мощности при сглаживающем параметре $p = 0,99$ (слева) и $p = 0,97$ (справа)

Fig. 3. Type of functions of neutron power and derivative of power with a smoothing parameter $p = 0.99$ (left) and $p = 0.97$ (right)

Коэффициенты многочленов a_i, b_i, c_i, d_i находятся из условия минимума функционала:

$$p \sum_i (y_i - s_i(t))^2 + (1-p) \int \frac{d^2s}{dt^2} * dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

где p – параметр сглаживания, y_i – среднее значение сглаживаемой величины на рассматриваемом интервале.

Функционал $\sum_i (y_i - s_i(t))^2$ является взвешенной невязкой экспериментальных данных и сплайна, а величина $\int \frac{d^2s}{dt^2} * dt$ определяет гладкость искомого сплайна.

При минимизации функционала, заданного в (5), получается решение, приближенно удовлетворяющее двум противоречащим требованиям:

- максимальной гладкости
- минимальной невязке сплайна и экспериментальных данных.

Соотношение между этими требованиями определяет сглаживающий параметр p , изменяющийся от 0 до 1. При $p = 1$ информация о гладкости кривой не учитывается, и аппроксимирующая кривая представляет собой интерполяционный кубический сплайн. При уменьшении p гладкость кривой возрастает, но начинает увеличиваться невязка сплайна и экспериментальных данных.

Параметр p следует выбирать максимально близким к 1 среди его значений, обеспечивающих гладкость и четко выраженный минимум производной аппроксимируемой функции мощности.

Варьируя сглаживающий параметр, начиная со значений близких к 1, можно получить, что уже при $p = 0,97$ производная от мощности визуально соответствует характерному виду функции реактивности в опыте по взвизанию стержней АР (рис. 3).

Итоговую оценку ПКР, полученную при аппроксимации сглаживающим кубическим сплайном параметров мощность и положение стержней АР из файла с высокой частотой регистрации, будем считать эталонной.

В работе рассмотрены 3 модели обработки опыта по взвизиванию:

- классический вариант обработки измерений, такт регистрации ТП – 500 мс (рис. 4);

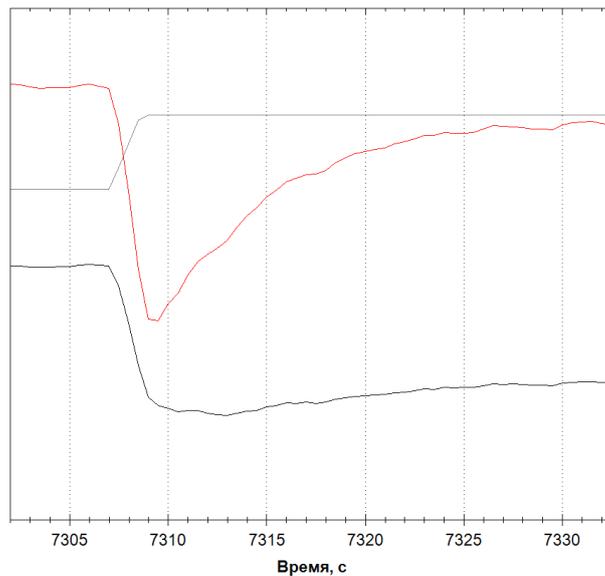


Рис. 4. Характерный вид кривых мощности (чёрный), реактивности (красный) и положение стержней (серый) при обработке опыта по взвешиванию по классическому варианту
 Fig. 4. Typical appearance of the curves of power (black), reactivity (red) and position of the rods (gray) when processing the experiment to determine the effectiveness of automatic regulation rods according to the classical version

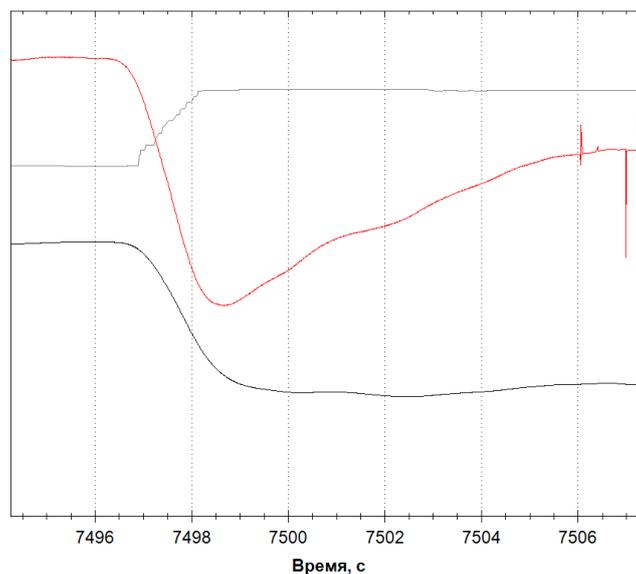


Рис. 5. Характерный вид кривых мощности (чёрный), реактивности (красный) и положение стержней (серый) при обработке опыта по взвешиванию по эталонному варианту
 Fig. 5. Typical appearance of the curves of power (black), reactivity (red) and position of the rods (gray) when processing the experiment to determine the effectiveness of the automatic regulation rod according to the reference version

— эталонный вариант обработки измерений. Для обработки измерений ПКР используется файл с тактом 500 мс, но с параметрами мощность и положение стержней из файла с высокой частотой регистрации ТП (аппроксимация сглаживающим сплайном). Характерный вид кривых мощности, реактивности и положения стержней при использовании этого варианта представлен на рис. 5;

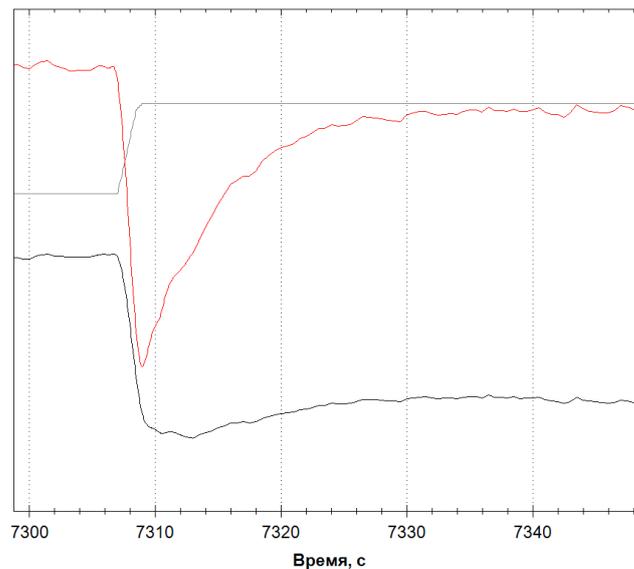


Рис. 6. Характерный вид кривых мощности (чёрный), реактивности (красный) и положение стержней (серый) при обработке опыта по взвешиванию с помощью файла с тактом 500 мс (параметр мощность аппроксимирован)

Fig. 6. Typical appearance of the curves of power (black), reactivity (red) and position of the rods (gray) when processing the experiment to determine the effectiveness of the automatic regulation rod using a file with a clock cycle of 500 ms (the power parameter is approximated)

— для обработки измерений ПКР используется файл с тактом 500 мс, но в опыте по взвешиванию участка стержней АР параметр мощность аппроксимирован сглаживающим сплайном (рис. 6);

Результаты исследования

При использовании для аппроксимации исходных данных сглаживающего сплайна (при разной частоте записи в файл (γ) аппроксимированной функции) для обработки опыта по определению $\rho_{\text{взв}}$ и БМКР было проведено сравнение оценок $\rho_{\text{взв}}$ на основе исходных данных из файлов с высокой и низкой (2 Гц) частотой регистрации ТП на представительном наборе измерений ПКР на реакторах Курской АЭС, Ленинградской и Смоленской АЭС. Для файла с тактом регистрации 500 мс использовались данные по мощности как со сглаживанием, так и без сглаживания. Результаты сравнения содержатся в табл. 1–3. Также в таблицах представлены отклонения оценок $\rho_{\text{взв}}$ и ПКР в различных вариантах обработки опыта по определению эффективности стержней АР от классического варианта обработки (такт 500 мс).

Близость оценок ПКР в случае аппроксимации ступенчатой функции мощности из файла с высокой частотой записи ТП (табл. 2) с различной γ дополнительно свидетельствует о корректном выборе модели аппроксимации [13, 14]. При этом очевидно, что чем выше частота записи аппроксимирующей функции в файл, тем точнее модель.

В сравнении оценок «веса» участка стержней АР и величины ПКР при использовании эталонной модели («Сгл. FULL, $\gamma = 100$ Гц» табл. 1) и классической («RGG» табл. 1) не было обнаружено существенных отличий между оцениваемыми параметрами, что свидетельствует о достаточности записи ТП с тактом 500 мс. Исходя из этого, можно сделать вывод об отсутствии необходимости в использовании файла с детальным поведением параметров «мощность» и «положение стержней» при обработке результатов измерений парового коэффициента реактивности как в опыте по взвешиванию участка стержней АР, так и в опытах с возмущением РПВ, ведь даже при определении эффективности АР (кратковременный скачкообразный процесс изменения мощности

Таблица 1

Результаты оценок веса участка ст. АР и ПКР на Курской АЭС

Table 1

Results of assessments of the efficiency of the automatic regulation rod and the void reactivity coefficient at the Kursk nuclear power plant

АЭС, блок	Вариант	$\rho_{взв}, \beta$	ПКР, β	Отклонение $\rho_{взв}, \%$	Отклонение ПКР, %
Курская, 4	RGG-файл	-0,04295	$0,788 \pm 0,09$	—	—
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,04273	$0,784 \pm 0,09$	+0,51	-0,51
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,04246	$0,782 \pm 0,08$	+1,15	-0,76
	Сгл. FULL, $\gamma = 100$ Гц	-0,04230	$0,783 \pm 0,09$	+1,51	-0,63
	Сгл. FULL, $\gamma = 20$ Гц	-0,04289	$0,786 \pm 0,09$	+0,13	-0,25
	Сгл. FULL, $\gamma = 2$ Гц	-0,04294	$0,787 \pm 0,09$	+0,02	-0,13
Курская, 3	RGG-файл	-0,02726	$0,494 \pm 0,11$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,02757	$0,498 \pm 0,11$	-1,13	+0,81
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,02747	$0,496 \pm 0,11$	-0,77	+0,40
	Сгл. FULL, $\gamma = 100$ Гц	-0,02788	$0,490 \pm 0,15$	-2,27	-0,81
	Сгл. FULL, $\gamma = 20$ Гц	-0,02807	$0,493 \pm 0,15$	-2,86	-0,20
	Сгл. FULL, $\gamma = 2$ Гц	-0,02816	$0,495 \pm 0,15$	-3,30	-0,20

Примечание: γ – частота записи в файл аппроксимирующей функции, FULL – файл с высокой частотой регистрации ТП, RGG – файл с тактом записи ТП 500 мс

Таблица 2

Результаты оценок веса участка ст. АР и ПКР на Ленинградской АЭС

Table 2

Results of assessments of the efficiency of the automatic regulation rod and the void reactivity coefficient at the Leningrad nuclear power plant

АЭС, блок	Вариант	$\rho_{взв}, \beta$	ПКР, β	Отклонение $\rho_{взв}, \%$	Отклонение ПКР, %
ЛАЭС, 3	RGG-файл	-0,05378	$0,561 \pm 0,13$	—	2014
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,05402	$0,564 \pm 0,13$	-0,45	+0,53
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,05408	$0,564 \pm 0,13$	-0,56	+0,53
ЛАЭС, 4	RGG-файл	-0,03969	$0,815 \pm 0,08$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,04006	$0,823 \pm 0,08$	-0,93	+1,0
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,04034	$0,830 \pm 0,08$	-1,64	+1,8

Примечание: γ – частота записи в файл аппроксимирующей функции, RGG – файл с тактом записи ТП 500 мс

(рис. 1), для описания которого требуется минимальный такт регистрации технологических параметров) наблюдается близость оценок ПКР при использовании классического и эталонного вариантов обработки опыта по взвешиванию. Максимальная разность оценок ПКР при

Таблица 3

Результаты оценок веса участка ст. участка ст. АР и ПКР на Смоленской АЭС

Table 3

Results of assessments of the efficiency of the automatic regulation rod and the void reactivity coefficient at the Smolensk nuclear power plant

АЭС, блок	Вариант	$\rho_{взв}, \beta$	ПКР, β	Отклонение $\rho_{взв}, \%$	Отклонение ПКР, %
САЭС, 1	RGG-файл	-0,01931	$0,634 \pm 0,12$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,01974	$0,647 \pm 0,12$	-2,22	+2,05
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,01969	$0,646 \pm 0,12$	-1,97	+1,89
САЭС, 2	RGG-файл	-0,03785	$0,635 \pm 0,08$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,03795	$0,635 \pm 0,08$	-0,26	0
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,03790	$0,635 \pm 0,08$	-0,13	0
САЭС, 3	RGG-файл	-0,03756	$0,475 \pm 0,07$	-----	-----
	Сгл. RGG, $\gamma = 20$ Гц	-0,03771	$0,477 \pm 0,07$	-0,40	+0,42
	Сгл. RGG, $\gamma = 5$ Гц	-0,03771	$0,477 \pm 0,07$	-0,40	+0,42

Примечание: γ – частота записи в файл аппроксимирующей функции, RGG – файл с тактом записи ТП 500 мс

использовании классического и эталонного вариантов не превышает $\pm 0,005 \beta_{эф}$, что на порядок ниже инструментальной составляющей погрешности измерения ПКР [15], представленной в Методике.

Сравнение результатов цифровой обработки идеализированного (файл с тактом регистрации 500 мс, параметр мощность аппроксимирован) и реального (файл с тактом регистрации 500 мс) электрических сигналов позволяет сделать вывод об инструментальной составляющей погрешности оценки веса участка стержней АР ($\rho_{взв}$) при выполнении опытов по измерению БМКР и ПКР. Согласно приведенным данным (табл. 1–3), различие результатов цифровой обработки идеализированного и реального электрических сигналов составляет $\sim 1,1\%$. Характер различий имеет вид нормального распределения с математическим ожиданием $\sim -0,5\%$ и случайной составляющей характеризующейся СКО $\sim 1,0\%$.

Величину инструментальной погрешности измерений малых значений реактивности (доли $\beta_{эф}$) при определении $\rho_{взв}$ на энергетическом уровне мощности можно оценить примерно в 1,0 %.

Кроме того, ввиду близости оценок $\rho_{взв}$ и ПКР (см. табл. 1–3) для реального и идеализированного сигналов (среднее отклонение ПКР $-0,76\%$, среднее отклонение $\rho_{взв} - 0,84\%$), можно сделать вывод об отсутствии необходимости аппроксимации параметра “мощность” в исходном файле с частотой регистрации 2 Гц.

Заключение

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) Такт дискретизации в 500 мс, соответствующий частоте в 2 герца, является достаточным для однозначного дискретного представления всех технологических параметров реактора и их последующей корректной обработки. Разница в оценках ПКР с использованием эталонного и классического вариантов обработки не превышает $\pm 0,005 \beta_{эф}$.

2) Инструментальная погрешность оценки веса участка стержней АР на основании сравнения исходного (файл с частотой регистрации ТП, равной 2 Гц) и идеализированного (файл с тактом регистрации 500 мс, параметр мощность аппроксимирован) сигналов составляет 1%.

3) На основании близости оценок ПКР и $\rho_{\text{взв}}$ показано, что нет необходимости в дополнительной аппроксимации параметра мощность из исходного файла с частотой регистрации ТП 2 Гц.

Таким образом, проблемы неопределенностей использования при обработке измерений ПКР (включая оценку веса участка стержней АР) данных, зарегистрированных с различной частотой, достаточно просто решаются регламентацией приемов обработки. В связи с этим в обновленном варианте Методики предлагается использовать только файл с тактом регистрации ТП 500 мс для расчётной обработки результатов измерений парового коэффициента реактивности [15].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Алимов Ю.В. и др.** НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ РБМК // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123. – № 5. – С. 266–269.

[2] **Асмолов В.Г.** Обеспечение безопасности и повышение эффективности атомной энергетики России // Тезисы докладов девятой Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – 2014. – С. 4. Драгунов Ю.Г. и др. Модернизация и продление сроков эксплуатации энергоблоков с РБМК // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 1. – С. 6–13.

[3] **Балыгин А.А., Краюшкин А.В.** Изменение реактивности и мощности РБМК при измерении парового коэффициента реактивности // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – № 3. – С. 171–172.

[4] **Качур С.А., Бутович Э.В., Зозулин А.А.** Определение влияния стержней регулирования на форму энерговыделения активной зоны реактора на основе статистических методов // Энергетические установки и технологии. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 31–37.

[5] **Camley R.E. et al.** High-frequency signal processing using magnetic layered structures // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2009. – Т. 321. – № 14. – С. 2048–2054.

[6] **Reigosa D. et al.** SPMSMs sensorless torque estimation using high-frequency signal injection // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 56. – № 3. – С. 2700–2708.

[7] **Житарев В.Е. и др.** Поправка к результатам измерения реактивности методом ОРУК // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2019. – № 3. – С. 4–12.

[8] **Абрамов Б.Д.** О методе ОРУК определения реактивности // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2004. – № 3. – С. 19–31.

[9] **Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.** Метод L-кривой для оценивания оптимального параметра сглаживающего кубического сплайна // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 11–1 (113). – С. 6–13.

[10] **Лавров А.В., Сизиков В.С.** Способ разделения большого числа линий зашумленного непрерывного спектра с использованием сглаживающих сплайнов // Уравнения типа свертки в науке и технологиях (ECTST–2019). – 2019. – С. 39–40.

[11] **Репина Е.Ю. и др.** К вопросу оптимизации параметров сглаживающего сплайна // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, 3-7 декабря 2018 г., г. Томск.—Томск, 2019. – 2019. – С. 116–117.

[12] **Тимофеев А.Л., Сулганов А.Х.** Влияние шума и частоты дискретизации на погрешность дискретного представления изображений // Информационно-управляющие системы. – 2021. – № 5 (114). – С. 33–39.

[13] **Wang L., Lowther D. A.** Selection of approximation models for electromagnetic device optimization // IEEE Transactions on Magnetics. – 2006. – Т. 42. – № 4. – С. 1227–1230.

[14] **Hu Y., Schennach S.M.** Instrumental variable treatment of nonclassical measurement error models // Econometrica. – 2008. – Т. 76. – № 1. – С. 195–216.

[15] Молчанов А.С. Исследование характеристик линейного разрешения и разрешающей способности цифровых аэрофотосистем с использованием теоремы Котельникова-Найквиста-Шеннона // Инженерные решения. – 2019. – № 2. – С. 8–14.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПРОХОРОВ Игорь Александрович – инженер, АО "ВНИИАЭС", без степени.

E-mail: prokhorov.igor2202@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4965-6792>

ИВАНОВ Илья Евгеньевич – ведущий научный сотрудник, АО "ВНИИАЭС", канд. физ.-мат. наук.

E-mail: IEIvanov@vniiaes.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2780-4896>

МОИСЕЕВ Игорь Фёдорович – руководитель проекта, АО "ВНИИАЭС", канд. физ.-мат. наук.

E-mail: mif898@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6220-0177>

ДРУЖИНИН Владимир Евгеньевич – руководитель департамента, АО "ВНИИАЭС", канд. техн. наук.

E-mail: dve@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4029-7699>

REFERENCES

[1] Yu.V. Alimov i dr., NEYTRONNO-FIZICHESKIE KhARAKTERISTIKI I YaDERNAYa BEZOPASNOST RBMK // Atomnaya energiya. – 2017. – Т. 123. – № 5. – С. 266–269.

[2] V.G. Asmolov, Obespecheniye bezopasnosti i povysheniye effektivnosti atomnoy energetiki Rossii // Tezisy dokladov devyatoy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoy energetiki». – 2014. – С. 4. Dragunov Yu.G. i dr. Modernizatsiya i prodleniye srokov ekspluatatsii energoblokov s RBMK // Atomnaya energiya. – 2012. – Т. 113. – № 1. – С. 6–13.

[3] A.A. Balygin, A.V. Krayushkin, Izmeneniye reaktivnosti i moshchnosti RBMK pri izmerenii parovogo koeffitsiyenta reaktivnosti // Atomnaya energiya. – 2006. – Т. 100. – № 3. – С. 171–172.

[4] S.A. Kachur, E.V. Butovich, A.A. Zozulin, Opredeleniye vliyaniya sterzhney regulirovaniya na formu energovydeleniya aktivnoy zony reaktora na osnove statisticheskikh metodov // Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii. – 2019. – Т. 5. – № 4. – С. 31–37.

[5] R.E. Camley et al., High-frequency signal processing using magnetic layered structures // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2009. – Т. 321. – № 14. – С. 2048–2054.

[6] D. Reigosa et al., SPMSMs sensorless torque estimation using high-frequency signal injection // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2020. – Т. 56. – № 3. – С. 2700–2708.

[7] V.Ye. Zhitarev i dr., Popravka k rezultatam izmereniya reaktivnosti metodom ORUK // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov. – 2019. – № 3. – С. 4–12.

[8] B.D. Abramov, O metode ORUK opredeleniya reaktivnosti // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika. – 2004. – № 3. – С. 19–31.

[9] Yu.Ye. Voskoboynikov, V.A. Boyeva, Metod L-krivoy dlya otsenivaniya optimalnogo parametra sglazhivayushchego kubicheskogo splayna // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. – 2021. – №. 11-1 (113). – С. 6–13.

[10] **A.V. Lavrov, V.S. Sizikov**, Sposob razdeleniya bolshogo chisla liniy zashumlennogo nepreryvnogo spektra s ispolzovaniyem sglazhivayushchikh splaynov // Uravneniya tipa svertki v nauke i tekhnologiyakh (ECTST–2019). – 2019. – S. 39–40.

[11] **Ye.Yu. Repina i dr.**, K voprosu optimizatsii parametrov sglazhivayushchego splayna // Molodezh i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, 3-7 dekabrya 2018 g., g. Tomsk. – Tomsk, 2019. – 2019. – S. 116–117.

[12] **A.L. Timofeyev, A.Kh. Sultanov**, Vliyaniye shuma i chastoty diskretizatsii na pogreshnost diskretnogo predstavleniya izobrazheniy // Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy. – 2021. – № 5 (114). – S. 33–39.

[13] **L. Wang, D.A. Lowther**, Selection of approximation models for electromagnetic device optimization // IEEE Transactions on Magnetics. – 2006. – T. 42. – № 4. – S. 1227–1230.

[14] **Y. Hu, S.M. Schennach**, Instrumental variable treatment of nonclassical measurement error models // Econometrica. – 2008. – T. 76. – № 1. – S. 195–216.

[15] **A.S. Molchanov**, Issledovaniye kharakteristik lineynogo razresheniya i razreshayushchey sposobnosti tsifrovyykh aerofotosistem s ispolzovaniyem teoremy Kotelnikova-Naykvista-Shennona // Inzhenernyye resheniya. – 2019. – № 2. – S. 8–14.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Igor A. PROKHOROV – JSK "VNIIAES".

E-mail: prokhorov.igor2202@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4965-6792>

Илья Е. IVANOV – JSK "VNIIAES".

E-mail: IEIvanov@vniiAES.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2780-4896>

Igor F. MOISEEV – JSK "VNIIAES".

E-mail: mif898@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6220-0177>

Vladimir E. DRUZHININ – JSK "VNIIAES".

E-mail: dve@list.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4029-7699>

Поступила: 17.11.2023; Одобрена: 18.12.2023; Принята: 18.12.2023.

Submitted: 17.11.2023; Approved: 18.12.2023; Accepted: 18.12.2023.

Научная статья

УДК 621.512.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>



С.С. Бусаров , К.А. Бакулин

Омский государственный технический университет,
г. Омск, Россия

 bssi1980@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БЕССМАЗОЧНЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТИХОХОДНЫХ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Аннотация. Одной из основных задач поршневых компрессорных машин является обеспечение высокой производительности сжимаемого газа. Известно, что наличие мёртвого объёма снижает эффективность работы любого поршневого компрессора, особенно сильное влияние оказывается при значительных величинах отношения давления нагнетания к давлению всасывания. В тихоходных машинах, рассматриваемых в данной работе, степень повышения давления превышает 100, что актуализирует работу над проблемой уменьшения вредного влияния мёртвого объёма на производительность компрессора. Уменьшение мёртвого объёма может быть достигнуто за счёт исключения линейного мёртвого объёма, занимающего большую его часть. Рассмотрены экспериментальные исследования конструкции, в которой на торцевой поверхности поршня, обращённой к клапанной плите, установлен резиновый (эластомерный) диск. Проведённые исследования показали, что применение резинового диска с возможностью касания предлагаемой конструкции поршня клапанной плиты практически полностью исключает линейный мёртвый объём. При этом повышение коэффициента подачи может достигать 20%.

Ключевые слова: тихоходный компрессор, мёртвый объём, линейный мёртвый объём, коэффициент подачи, эффективность рабочего процесса.

Для цитирования:

Бусаров С.С., Бакулин К.А. Повышение производительности бесшмазочных малорасходных тихоходных поршневых компрессоров среднего и высокого давления // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>S.S. Busarov , K.A. Bakulin

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

 bssi1980@mail.ru

INCREASING THE PERFORMANCE OF LUBRICATION-FREE, LOW-FLOW, LOW-SPEED, MEDIUM- AND HIGH-PRESSURE RECIPROCATING COMPRESSORS

Abstract. One of the main tasks of piston compressor machines is to provide high productivity of compressed gas. It is known that the presence of dead volume reduces the operating efficiency of any piston compressor; the effect is especially strong at significant values of the ratio of discharge pressure to suction pressure. In low-speed machines considered in this work, the pressure increase ratio exceeds 100, which actualizes work on the problem of reducing the harmful effect of dead volume on compressor performance. Dead volume can be reduced by eliminating the linear dead volume, which takes up its majority. Experimental studies of a design in which a rubber (elastomer) disc is installed on the end surface of the piston facing the valve plate are considered. The conducted studies showed that the use of a rubber disk with the possibility of touching the proposed design of the valve plate piston almost completely eliminates linear dead volume. In this case, the increase in the feed rate can reach 20%.

Keywords: low-speed compressor, dead volume, linear dead volume, flow rate, workflow efficiency.

Citation:

S.S. Busarov, K.A. Bakulin, Increasing the performance of lubrication-free, low-flow, low-speed, medium- and high-pressure reciprocating compressors, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 82–90, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30104>

Введение. В поршневых компрессорах основное снижение производительности происходит из-за конструктивных особенностей, которой нет во многих других типах компрессоров, а именно наличие мёртвого объёма [1, 2]. Оставшийся в мёртвом объёме газ после завершения процесса нагнетания начинает расширяться до тех, пор пока давление не упадёт до давления всасывания. Это приводит к потере полезного хода поршня и соответственно к снижению коэффициента подачи. Наиболее значимой составляющей мёртвого объёма является линейный мёртвый объём, снижение значения которого может существенно улучшить показатели эффективности рабочего процесса компрессора.

В данной работе рассмотрен тихоходный поршневой компрессор. Особенностью такого поршневого компрессора является возможность получения повышенного значения отношения величины давления нагнетания к давлению всасывания [3–5]. Так для существующих поршневых компрессоров степень повышения давления в одноступенчатой машине редко превышает значение 6...8 [6, 7]. В тихоходном компрессоре за счёт вытянутой формы цилиндра и длительного процесса сжатия [8] значение степени повышения давления может достигать 100 и более [9]. Однако при этом показатели эффективности рабочего процесса остаются на низком уровне. Повысить коэффициент подачи и индикаторный изотермический КПД возможно за счёт снижения величины мёртвого объёма.

В работе [10] предложено решение по уменьшению линейного мёртвого объёма за счёт установки резинового диска на торцевую поверхность поршня.

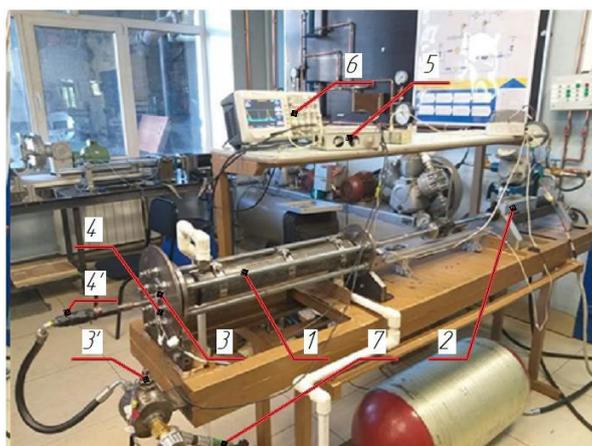


Рис. 1. Экспериментальный стенд: 1 – тихоходная поршневая ступень, 2 – гидравлический привод, 3,3' – датчик давления, 4,4' – датчик температуры, 5 – система сбора данных, 6 – цифровой осциллограф, 7 – датчик расхода

Fig. 1. Experimental unit: 1 – low-speed piston stage, 2 – hydraulic drive, 3,3' – pressure sensor, 4,4' – temperature sensor, 5 – data acquisition system, 6 – digital oscilloscope, 7 – flow sensor

Проведём эксперимент с данным конструктивным элементом с целью определения влияния изменения конструкции на интегральные характеристики компрессора.

Методы и материалы

Объектом исследования является тихоходный компрессор представляет собой поршневую ступень с гидравлическим приводом: геометрические параметры ступени – диаметр цилиндра 50 мм, ход поршня 500 мм; режим работы – время цикла 2...4 с, давление всасывания 0,1 МПа, давление нагнетания до 10МПа; сжимаемый газ воздух, охлаждение ступени – интенсивное водяное.

Экспериментальный стенд представляет собой компрессор с системой сбора данных, позволяющей определять параметры газа в рабочей камере, давление и температуру нагнетания, а также расход газа.

Фотография стенда представлена на рис. 1.

Эксперимент проводился следующим образом: работа гидравлического привода 2 обеспечивает сжатие газа в тихоходной поршневой ступени 1 (за счёт возвратно-поступательного движения поршня), при выходе на режим система сбора данных 5 обеспечивает поступление сигналов с датчика давления 3 и температуры 4, расположенных в рабочей камере тихоходной поршневой ступени 1, а также датчиков расхода 7 на экран цифрового осциллографа 6. Средняя температура нагнетаемого газа и давление нагнетания определяется соответственно датчиками 4' и 3'. Эксперимент проводился при наличии на торце поршня резинового диска и без него. Фотография поршня 1 с резиновым диском 2 представлена на рис. 2.

Полученные зависимости коэффициента подачи на различных режимах работы представлены на рис. 3–6.

Была проведена оценка погрешности определения измеряемых величин.

Методика определения погрешности измерений представлена в работе [11].

Погрешность измерения величин, определяемых при проведении экспериментальных исследований представлена в работе [12].

Общая погрешность измерений составила (не более): для давления – 1,72%, для температуры – 1,57 %, для расхода – 2%.

Определение коэффициента подачи основано на известной зависимости [13–15]:

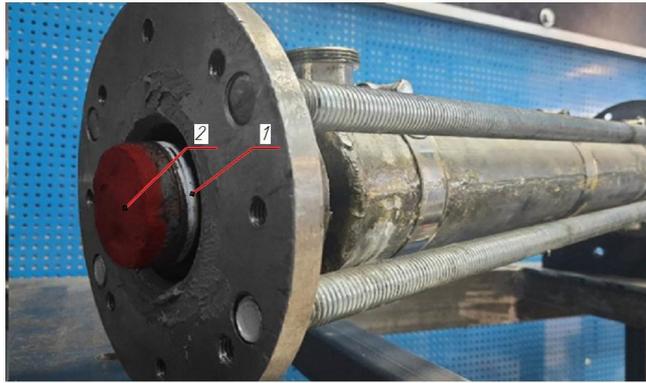


Рис. 2. Вид поршня с резиновым диском: 1 – поршень, 2 – резиновый диск

Fig. 2. View of a piston with a rubber disk: 1 – piston, 2 – rubber disk

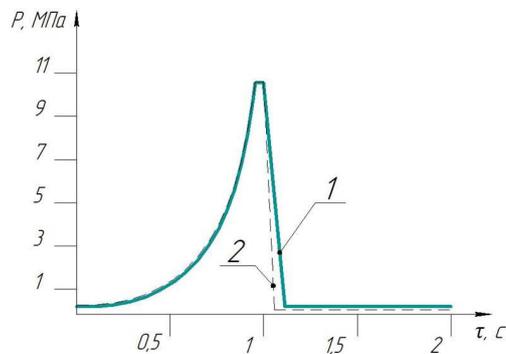


Рис. 3. График изменения мгновенного давления в рабочей камере:
1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском

Fig. 3. Graph of changes in instantaneous pressure in the working chamber:
1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

$$\lambda = \frac{V_e}{V_h}, \quad (1)$$

где V_h – теоретическая производительность, $\text{м}^3/\text{с}$.

Производительность компрессора определяется показаниями датчика расхода при давлении нагнетания и температуре нагнетания, после этого производится пересчёт полученного значения на условия всасывания компрессора – V_e .

Результаты

На рис. 3 представлены зависимости изменения давления в рабочей камере за время цикла. Видно, что процесс обратного расширения при установке резинового диска имеет более крутую характеристику, что подтверждает уменьшение влияния мёртвого объёма на производительность ступени компрессора.

На рис. 4 представлены зависимости средней температуры сжатого воздуха от величины отношения давления нагнетания к давлению всасывания. В связи с повышением производительности компрессора за счёт практического исключения линейного мёртвого объёма при использовании эластомерного диска, масса газа при сжатии увеличилась, соответственно возросла и температура.

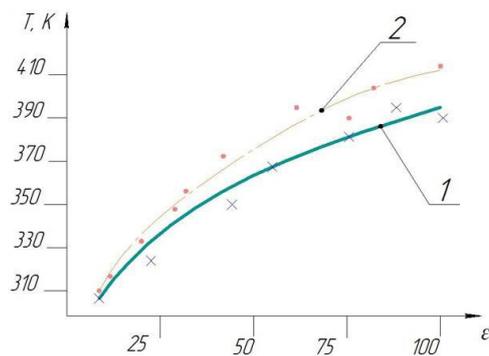


Рис. 4. Зависимость средней температуры газа от величины отношения давления нагнетания к давлению всасывания: 1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском
 Fig. 4. Dependence of the average gas temperature on the ratio of discharge pressure to suction pressure: 1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

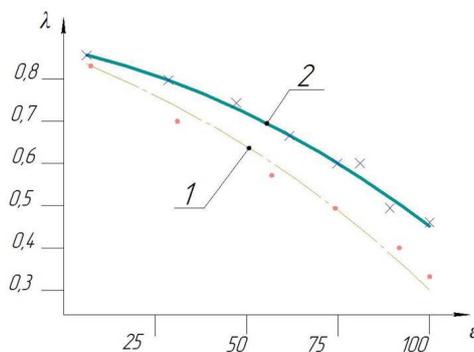


Рис. 5. Графики изменения производительности при рассмотренных конструкциях поршня (время цикла 2 с):
 1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском
 Fig. 5. Graphs of changes in performance for the considered piston designs (cycle time 2 s):
 1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

На рис. 5, 6 экспериментальные кривые, характеризующие изменение производительности компрессора в случае исключения мёртвого объёма и в случае исходной конструкции компрессора. Установка резинового диска, практически исключает линейный мертвый объём, что ведёт к увеличению производительности на 10...20% в зависимости от режима работы компрессора.

Обсуждение

Полученное значение относительного мёртвого объёма для экспериментальной ступени с диаметром цилиндра 0,05 м и ходом поршня 0,5 м составляет при установке резинового диска – 0,3%. То есть за счёт оставшегося вредного пространства в клапанах и в кольцевом пространстве. Возможно, при деформациях резинового диска, деформируемая часть эластомера частично занимала указанные вредные пространства. При этом фактический мёртвый объём был ещё ниже. При работающем компрессоре точно определить значение мёртвого объёма пока не удаётся.

Заключение

Использование запатентованного решения по исключению линейного мёртвого пространства подтвердило, что улучшить показатели производительности тихоходных компрессоров можно за счёт установки резинового диска на торце поршня, при этом практически исключается линейный

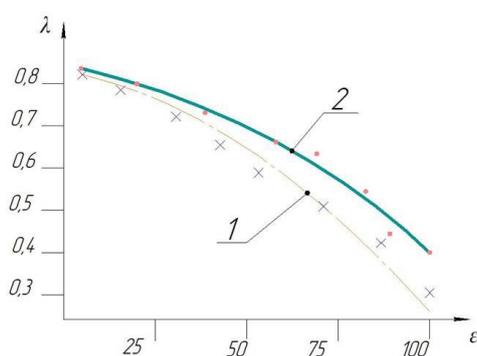


Рис. 6. Графики изменения производительности при рассмотренных конструкциях поршня (время цикла 4 с):
1 – без резинового диска, 2 – с резиновым диском

Fig. 6. Graphs of changes in performance for the considered piston designs (cycle time 4 s):
1 – without a rubber disk, 2 – with a rubber disk

мёртвый объём. Коэффициент подачи при этом можно увеличить до 20% и в проведённых исследованиях данный параметр достигал значения 0,6 при степени повышения давления 100. При этом дальнейшие исследования будут направлены на подбор материала диска и обоснования ресурсных показателей предложенной конструкции, а также создания модели расчёта, учитывающую наличие резинового диска на поршне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Юша В.Л. Научно-технологические предпосылки совершенствования и промышленного освоения малорасходных компрессорных агрегатов на базе длинноходовых поршневых ступеней // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С. 24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39
- [2] Котлов А.А. Математический анализ работы двухступенчатого дожимающего компрессора, предназначенного для сжатия метана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 51–60. DOI: 10.18721/JEST.24405
- [3] Бусаров С.С. Перспективы создания малорасходных компрессорных агрегатов среднего и высокого давления на базе унифицированных тихоходных длинноходовых ступеней / С.С. Бусаров, В.Л. Юша // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 4. – С. 80–89.
- [4] Юша В.Л. Экспериментальное исследование рабочих процессов тихоходных длинноходовых бессмазочных поршневых компрессорных ступеней при высоких отношениях давлений нагнетания к давлению всасывания / В.Л. Юша, С.С. Бусаров, А.В. Недовенчаный, Р.Ю. Гошля // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 2. С. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18
- [5] Yusha V.L. Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low-speed reciprocating compressor stages in compression of different gases [tekst] // Chemical and Petroleum Engineering – 2018. – Vol. 54, pp. 593–597.
- [6] Котлов А.А., Бураков А.В. Сравнительный анализ работы одноступенчатого поршневого компрессора, сжимающего различные газы // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 4. С. 26–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35

- [7] **Прилуцкий А.И.** Теплообмен в ступенях машин объёмного действия. Современный подход / А.И. Прилуцкий, И.К. Прилуцкий, Д.Н. Иванов, А.С. Демаков // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – № 2. – С. 16–23.
- [8] **Бусаров С.С.** Эволюция конструкций тихоходных длинноходовых компрессорных ступеней и актуальность их развития // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – Вып. 12. – С. 464–469. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-12-464-469
- [9] **Недовенчаный А.В.** Повышение энергетической и динамической эффективности поршневого малорасходного одноступенчатого компрессорного агрегата с линейным гидроприводом: дис. канд. техн. наук / А. В. Недовенчаный. – Омск, 2020. – 232 с.
- [10] Патент № 2694104 Российская Федерация, МПК F04B 39/04 (2006.01), F04B 53/14 (2006.01). Поршневой компрессор: № 2018132179; заявл. 07.09.2018; опубл. 09,07,2019/ В.Л. Юша, С.С. Бусаров, А.В. Недовенчаный [и др.]; заявитель ОмГТУ. – 5с.: ил. – Текст: непосредственный.
- [11] **Грановский В.С.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.С. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
- [12] **Бусаров С.С.** Экспериментальная оценка влияния частоты вращения коленчатого вала на амплитуду пульсаций давления в газовых коммуникациях малорасходных поршневых компрессоров / С.С. Бусаров, А.В. Недовенчаный, К.А. Бакулин, Н.Г. Синицин, А.А. Панютнич // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 2. С. 21–26. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-21-26
- [13] **Кузнецов Л.Г.** Повышение герметичности поршневых компрессоров и детандеров / Л.Г. Кузнецов, Ю.И. Молодова, А.И. Прилуцкий // Холодильная техника. – 1999, № 9, – с. 24–25.
- [14] **Юша В.Л.** Системы охлаждения и газораспределения объёмных компрессоров. – Новосибирск: Наука, 2006. – 286 с.
- [15] **Прилуцкий И.К.** Разработка, исследование и создание поршневых компрессоров и детандеров для криогенной техники: дисс. на соиск.уч. степ, д.т.н., – Л., 1991. – 401 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БУСАРОВ Сергей Сергеевич – доцент, Омский государственный технический университет, канд. техн. наук.
E-mail: bssi1980@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8894-0547>

БАКУЛИН Константин Александрович – студент, Омский государственный технический университет, без степени.
E-mail: Konstantin_bakulin_2001@mail.ru

REFERENCES

- [1] **V.L. Yusha**, Nauchno-tekhnologicheskiye predposylki sovershenstvovaniya i promyshlennogo osvoyeniya maloraskhodnykh kompressornykh agregatov na baze dlinnokhodovykh porshnevykh stupeney // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2022. Т. 6, № 3. С.24–39. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-3-24-39
- [2] **A.A. Kotlov**, Matematicheskiy analiz raboty dvukhstupenchatogo dozhimayushchego kompressora, prednaznachennogo dlya szhatiya metana // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. 2018. Т. 24, № 4. С. 51–60. DOI: 10.18721/JEST.24405

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

[4] **V.L. Yusha**, Eksperimentalnoye issledovaniye rabochikh protsessov tikhokhodnykh dlinnokhodovykh bessmazochnykh porshnevykh kompressornykh stupeney pri vysokikh otnosheniyakh davleniy nagnetaniya k davleniyu vsasyvaniya / V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyy, R.Yu. Goshlya // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2018. T. 2, № 2. S. 13–18. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-2-13-18

[5] **V.L. Yusha**, Experimental evaluation of the efficiency of long-stroke, low-speed reciprocating compressor stages in compression of different gases [tekst] // Chemical and Petroleum Engineering–2018. – Vol. 54, pp. 593–597.

[6] **A.A. Kotlov, A.V. Burakov**, Sravnitelnyy analiz raboty odnostupenchatogo porshneвого kompressora, szhimayushchego razlichnyye gazy // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2019. T. 3, № 4. S. 26–35. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-4-26-35

[7] **A.I. Prilutskiy**, Teploobmen v stupenyakh mashin ob'yemnogo deystviya. Sovremennyy podkhod / A.I. Prilutskiy, I.K. Prilutskiy, D.N. Ivanov, A.S. Demakov // Kompessornaya tekhnika i pnevmatika. – 2009. – № 2. – S. 16–23.

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

[9] **A.V. Nedovenchanyy**, Povysheniye energeticheskoy i dinamicheskoy effektivnosti porshneвого maloraskhodnogo odnostupenchatogo kompressornogo agregata s lineynym gidroprivodom: dis. kand. tekhn. nauk / A.V. Nedovenchanyy. – Omsk, 2020. – 232 s.

[10] Patent № 2694104 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F04B 39/04 (2006.01), F04B 53/14 (2006.01). Porshnevoy kompressor: № 2018132179; zayavl. 07.09.2018; opubl. 09.07.2019 / V.L. Yusha, S.S. Busarov, A.V. Nedovenchanyy [i dr.]; zayavitel OmGTU. – 5s.: il. – Tekst: neposredstvennyy.

[11] **V.S. Granovskiy**, Metody obrabotki eksperimentalnykh dannykh pri izmereniyakh / V.S. Granovskiy, T.N. Siraya. – L.: Energoatomizdat, 1990. – 288 s.

[12] **S.S. Busarov**, Eksperimentalnaya otsenka vliyaniya chastoty vrashcheniya kolenchatogo vala na amplitudu pulsatsiy davleniya v gazovykh kommunikatsiyakh maloraskhodnykh porshnevykh kompressorov / S.S. Busarov, A. V. Nedovenchanyy, K.A. Bakulin, N.G. Sinitsin, A.A. Panyutich // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2022. T. 6, № 2. S. 21–26. DOI: 10.25206/2588-0373-2022-6-2-21-26

[13] **L.G. Kuznetsov**, Povysheniye germetichnosti porshnevykh kompressorov i detanderov / L.G. Kuznetsov, Yu.I. Molodova, A.I. Prilutskiy // Kholodilnaya tekhnika. – 1999, № 9, – s. 24–25.

[14] **V.L. Yusha**, Sistemy okhlazhdeniya i gazoraspredeleniya obyemnykh kompressorov. – Novosibirsk: Nauka, 2006. – 286 s.

[15] **I.K. Prilutskiy**, Razrabotka, issledovaniye i sozdaniye porshnevykh kompressorov i detanderov dlya kriogennoy tekhniki: diss. na soisk.uch. step, d.t.n., – L., 1991. – 401 s.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Sergey S. BUSAROV – Omsk State Technical University.

E-mail: bssi1980@mail.ru

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

Konstantin A. BAKULIN – *Omsk State Technical University*.

E-mail: Konstantin_bakulin_2001@mail.ru

Поступила: 23.11.2023; Одобрена: 25.12.2023; Принята: 25.12.2023.

Submitted: 23.11.2023; Approved: 25.12.2023; Accepted: 25.12.2023.

Научная статья

УДК 504.052

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30105>



А.В. Федюхин ✉, Е.Г. Гашо

Национальный исследовательский университет "МЭИ",
Москва, Россия

✉ FedyukhinAV@yandex.ru

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕТАБОЛИЗМА ГОРОДОВ

Аннотация. Городские энергосистемы подвержены интенсивному и разнонаправленному влиянию множества технических, экологических, экономических, социальных и культурных факторов. Задача эффективного стратегического планирования урбанизированных территорий является одним из важнейших вызовов, с которым сталкивается наша цивилизация в XXI веке. Ключ к решению данной задачи кроется в разработке междисциплинарного и научно обоснованного подхода к анализу городского метаболизма с позиций энергетической эффективности и экологической безопасности. В сфере городского планирования встречается не так много научных работ о городской энергетике. Чаще внимание уделяется социальным, культурным, экономическим, экологическим или транспортным аспектам. В то же время дефицит электрических и тепловых мощностей в ряде городов России, высокий износ коммунальных сетей, проблемы с вывозом и эффективной утилизацией отходов приводит к необходимости применения системного подхода для анализа энергетических потоков города и сопутствующего экологического ущерба. В настоящей статье проанализированы укрупненные энергетические показатели мегаполисов мира с разработкой методического подхода к изучению энергоэкологического метаболизма города.

Ключевые слова: метаболизм городов, городское планирование, коммунальная энергетика, энергопотребление, энергосбережение.

Для цитирования:

Федюхин А.В., Гашо Е.Г. Методические подходы к анализу энергоэкологического метаболизма городов // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 91–107. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30105>

A.V. Fedyukhin  , E.G. GashoNational Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russia FedyukhinAV@yandex.ru

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ANALYSIS OF ENERGY-ECOLOGICAL METABOLISM OF CITIES

Abstract. Urban energy systems are subject to the intense and multidirectional influence of a variety of technical, environmental, economic, social and cultural factors. The task of effective strategic planning of urbanized territories is one of the most important challenges facing our civilization in the 21st century. The key to solving this problem lies in the development of an interdisciplinary and scientifically based approach to the analysis of urban metabolism from the standpoint of energy efficiency and environmental safety. There are not many scientific papers on urban energy in the field of urban planning. More often, attention is paid to social, cultural, economic, environmental or transport aspects. At the same time, the shortage of electrical and thermal capacities in a number of Russian cities, high wear of utility networks, problems with the removal and effective disposal of waste leads to the need for a systematic approach to analyze the energy flows of the city and the associated environmental damage. This article analyzes the enlarged energy indicators of megacities of the world with the development of a methodological approach to the study of the energy-ecological metabolism of the city.

Keywords: urban metabolism, urban planning, municipal energy system, energy consumption, energy conservation.

Citation:

A.V. Fedyukhin, E.G. Gasho, Methodological approaches to the analysis of energy-ecological metabolism of cities, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 91–107, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30105>

Введение. Современные подходы по повышению качества жизни в мегаполисах направлены, как правило, на цифровизацию и автоматизацию функционирования систем жизнеобеспечения города. Не принижая значимости концепции Smart City или методики оценки IQ городов Российской Федерации, стоит уделять большее внимание энергетической и технологической эффективности мегаполиса с сохранением требований по экологической безопасности инфраструктуры. Разработка практически обоснованного базиса для анализа энергетических потоков позволит задать вектор городского планирования в контексте увязки схем тепло-, электро- и топливоснабжения (в частности, газоснабжения) для повышения безопасности и автономности функционирования урбанизированных территорий.

Важно отметить, что подходы по оценке метаболизма города с акцентом на экономические факторы, такие как: ВВП на душу населения или ВВП на единицу потребленной энергии несут в себе риски спекулятивного характера. Переход на денежные эквиваленты при анализе проблем системного характера чреват выбором стратегически неверных решений в силу сильной волатильности стоимости широкого спектра товаров и услуг. Тем самым важно оперировать, в первую очередь, физическими величинами на базе материальных и энергетических балансов. В то же время, энергоэкологический метаболизм – это не балансовый метод в чистом виде, а алгоритм поиска направлений стратегического планирования города, опирающийся на топливно-энергетический баланс и иные документы, регламентирующие его энергетическое хозяйство.

Обзор методических подходов к анализу метаболизма городов

Стратегическое планирование города является многомерной и многоуровневой задачей, охватывающей взаимосвязанные аспекты жизни человека и поэтому по природе своей может быть решена исключительно в разрезе междисциплинарного научного подхода. Как правило, под стратегическим планированием городского развития подразумевается метод обеспечения конкурентоспособности города в условиях глобализации и с акцентом на социально-экономические показатели. В то же время вопросы стратегического планирования энергосистемы города зачастую рассматриваются в отраслевых документах, такие как Схемы тепло-, газо- и электроснабжения, Техническая политика локальных энергокомпаний или Энергетическая стратегия (Генеральная схема энергоснабжения) города.

В сфере городского планирования встречается не так много научных работ о городской энергетике. Чаще внимание уделяется социальным, культурным, экономическим, экологическим или транспортным аспектам [1, 2]. В то же время дефицит электрических и тепловых мощностей в ряде городов России, высокий износ коммунальных сетей, проблемы с вывозом и эффективной утилизацией отходов приводит к необходимости применения системного подхода для анализа энергетических потоков города и сопутствующего экологического ущерба.

Увеличение численности населения городов и тенденция к образованию городских агломераций неизбежно приводят к усложнению транспортной, энергетической и коммунальной инфраструктуры [3]. Что в свою очередь, повышает требования к управлению и упорядочиванию потоков энергоресурсов и отходов, образующихся на урбанизированных территориях [4, 5]. Термин «городской метаболизм» появляется в научно-технической литературе середине 60-х годов. В [6] приводится обзор оригинальных источников, в которых предложены концептуальные основы социально-экологического метаболизма городов. Ермолаева П.О. подчеркивает, что ряд исследований направлено на количественный анализ материальных потоков с построением различных моделей и балансов. В то же время городской метаболизм часто рассматривается в контексте политических, исторических или социальных наук, оставляя вне фокуса внимания энергетические, технологические и экологические аспекты функционирования мегаполиса.

Пилотным исследованием в области городского метаболизма принято считать работу Уолмана [7], который в 1965 году представил структуру города с учетом потоков энергии, отходов и водных ресурсов. С современной точки зрения такой подход может казаться упрощенным на фоне наличия практики составления топливно-энергетических балансов регионов и населенных пунктов, однако, работа Уолмана позволила, в первую очередь, акцентировать внимание на данной проблематике и создать базис для дальнейших исследований. Следующей важной вехой стала разработка специфичных количественных показателей для оценки особенностей функционирования городской инфраструктуры. В представленной в 1983 году работе Одума [8] предложена методика оценки энергетических потоков через эквиваленты солнечной энергии как универсальной метрики. Очередной виток развития исследований в данной области пришелся на 2000-е годы, когда в научно-технической литературе и средствах массовой информации начали широко обсуждаться вопросы возобновляемых источников энергии, способов обращения с отходами и снижения выбросов парниковых газов.

В [9] понятие городской метаболизм трактуется следующим образом: «Городской метаболизм – это системно-ориентированный подход к пониманию взаимосвязи между социально-экономическим положением города и природной средой посредством использования ресурсов». В качестве первого шага специалисты разделили территорию Китая на 5 климатических зон, далее ввели следующие переменные:

- валовый внутренний продукт на душу населения;
- численность населения;
- плотность населения;

- тип климата;
- годовое потребление топливно-энергетических и природных ресурсов, включая электроэнергию, ископаемое топливо, биомассу, воду, минералы, металлы, строительные материалы.

Такой подход позволит получить набор укрупненных удельных энергетических, экономических и экологических показателей для классификации городов Китая с использованием модели классификации и регрессии с построением дерева (CART). Результатом исследования стало выделение 8 метаболических профилей городов: тип I (низкий уровень метаболизма), тип II (уровень метаболизма от низкого до среднего), тип III (биомасса и строительные материалы доминируют в метаболическом профиле), тип IV (электричество и ископаемое топливо доминируют в метаболическом профиле), тип V (электричество и вода доминируют в метаболическом профиле), тип VI (ископаемое топливо доминирует в метаболическом профиле), тип VII (средний и высокий уровень метаболизма) и тип VIII (общее потребление топливно-энергетических доминирует в метаболическом профиле).

Специалисты Лувенского научно-исследовательского института ландшафта, архитектуры и застроенной среды (Бельгия) рассматривают проблематику городского метаболизма через призму экосистемных услуг [10]. При таком подходе основной акцент направлен на анализ эффективности потребления и регенерации городом природных ресурсов: биомасса, ископаемое топливо, минералы и пр. В фокус внимания в качестве выходных потоков попадают выбросы вредных веществ, твердые коммунальные отходы и канализационные стоки. Предложенная авторами модель городского метаболизма позволяет выделить основные угрозы (изменение климата, истощение плодородных земель и пр.), управляющие воздействия (промышленное производство, сельское хозяйство и пр.), а также удельные показатели потребления ресурсов, показав зависимость между ними.

В [11] представлен оригинальный инструмент на основе машинного обучения, способный не только обрабатывать большие массивы статистических данных о текущем состоянии городской среды, но и прогнозировать динамику изменения ключевых показателей метаболизма. В качестве объекта специалисты рассматривают г. Лиссабон, выделяя следующие группы индикаторов: социальные, культурные, технологические, экологические. В качестве результата инструмент предлагает количественную оценку по следующим показателям: финансовый и человеческий капитал, состояние окружающей среды, уровень системы здравоохранения и пр.

Методика, представленная в [12], направлена на исследование материальных потоков города. Причем, специалистов интересует не только конечное потребление энергоресурсов и продуктов внутри населенного пункта, но и так называемый материальный след, который учитывает всю цепочку производства конечного продукта. В методике выделяется два основных показателя: внутреннее потребление материалов (общее количество материалов, непосредственно использованных в экономике города), индикатор материального следа (общее количество материалов, использованных вне экономики города для создания потребляемых материалов и продуктов). Материальные потоки, в свою очередь, подразделяются на четыре основные группы: биомасса, ископаемые, металл, неметалл. Подобная методика позволяет оценить основные цепочки поставок энергоресурсов и иных продуктов, а также систематизировать города по типу промышленных производств.

С учетом мирового тренда на декарбонизацию встречаются методики, рассчитывающие углеродный след в контексте городского метаболизма. В [13] проводится сравнение углеродного следа Пекина, Шанхая, Вены и Мальмё с выделением семнадцати секторов: сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых, промышленность, энергетика, водоснабжение, строительство, торговля, транспорт, жилая недвижимость, связь, финансы, коммерческая недвижимость, наука, безопасность, образование, здравоохранение, искусство. Данный подход позволяет не только оценить валовые выбросы при разделении по секторам, но и сравнить удельные показатели на душу населения для разных населенных пунктов.

Схожий подход, однако, в более упрощенной форме наблюдается в работе [14]. Специалисты приводят краткий обзор развития подходов к оценке городского метаболизма и предлагают наряду с традиционными энергетическими и материальными потоками учитывать углеродный след. Важно отметить, что в [24] приводятся данные по валовым и удельным выбросам парниковых газов для десятков городов Европы, Азии и Северной Америки.

Отдельного внимания заслуживают работы, посвященные исследованию метаболизма с акцентом на проблематику рассматриваемого города. К примеру, в [15] объектом внимания является г. Бангалор и его система водоснабжения и водоотведения, являющаяся критически важным инфраструктурным элементом. Специалисты отмечают, что города все больше зависят от крупных источников воды, таких как отдаленные реки, моря и океан, для удовлетворения своих потребностей в воде. Однако, баланс водопотребления крупных городов можно оптимизировать, используя альтернативные местные источники воды, такие как сточные воды, дождевая вода и ливневая канализация. Предложенная модель позволяет рассчитать потенциал в рациональном потреблении водных ресурсов и использовании местных источников воды.

Схожие задачи решаются в [16], однако, для данного объекта исследования (г. Порт-Луи, о. Маврикий) уязвимой точкой является система обращения с отходами. В силу островного расположения города, метаболический подход рассматривается в парадигме потребления первичных энергоресурсов и продуктов с фокусом на объем образующихся отходов и методы их эффективной и экологичной утилизации. Причем спектр отходов не ограничивается только твердыми коммунальными отходами, а включает в себя промышленных отходы, загрязненные сточные воды, выбросы парниковых газов, а также тепловое и шумовое загрязнение города.

В свою очередь, в [17] представлена сравнительно простая, но в то же время всеохватывающая модель оценки энергетического аспекта городского метаболизма с разделением на носителей первичной энергии (природные ресурсы), носителей вторичной энергии (промышленность и энергетика) и конечные потребители энергии (транспорт, здания, системы потребления тепловой и электрической энергии и пр.). Такой подход позволяет проследить всю цепочку преобразования энергии в разрезе городской инфраструктуры.

В [18] предложены механизмы стратегического планирования развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса. Авторами выполнены балансовые расчеты энергетического профиля г. Москвы при внедрении ряда мероприятий: утепление зданий, увеличение доли электромобилей, рост комбинированной выработки тепловой и электрической энергии и др. Одним из преимуществ подхода, предложенного в [18] является визуализация топливно-энергетического баланса города с учетом возможности перераспределения различных энергетических потоков в значимости от внедряемых энергосберегающих мероприятий. В то же время требует дополнительной проработки вопрос ранжирования мероприятий по значимости с учетом фактических проблем в сфере энергетики или экологии отдельно взятого города.

Статистические данные по ежегодному потреблению энергии, воды и объему образовавшихся отходов для 27 крупнейших городов мира представлены в [19]. Авторы анализируют динамику изменения упомянутых показателей в разрезе первого десятилетия XXI века по всем городам с населением свыше 10 млн. человек, включая Москву, и оценивают вклад мегаполисов в мировые показатели. К примеру, общее население мегаполисов составляет 6,7 % от мирового, тогда как ВВП – 14,6 %, потребление электроэнергии – 9,3 %, объем отходов – 12,6%.

В [20] на примере Сан-Паулу предложен оригинальный подход по оценке эффективности потребления энергии городом на основе эксергетического анализа. Специалисты университета Сан-Паулу классифицируют как виды потребителей (промышленность, транспорт, коммерческие здания и др.), так и виды энергоносителей (природный газ, этанол, электроэнергия) с составлением балансов и оценкой эффективности использования энергии. Такой подход позволяет наглядно сравнивать разные виды потребителей с точки зрения их эксергетической

эффективности, однако, не всегда способен определить реалистичные приоритеты развития города в силу технических, экономических или социальных барьеров для перераспределения энергоносителей в пользу более эффективных потребителей.

Анализ энергетических показателей города

Известен ряд источников, с помощью которых можно анализировать уровень метаболизма городов: топливно-энергетические балансы городов и регионов, данные государственной статистики по выработке и потреблению энергии, научно-технические публикации, независимые базы данных различных экспертных организаций и университетов. Ключевым моментом является достоверность источника данных и корректность приводимой информации. К примеру, ресурс CDP Cities, States and Regions Open Data Portal¹ имеет огромную базу данных по городам мира, включая информацию о видах источниках генерации электрической энергии. При этом, исходя из данных неочевидно, составлен ли баланс, на основании установленной мощности электростанции или их годовой выработки. При сравнении баланса с государственной статистикой, к примеру, для городских агломераций Торонто² или Нью-Йорк³, можно заключить, что представленные в CDP Cities, States and Regions Open Data Portal соотношения характерны именно для установленной мощности, тогда как КИУМ возобновляемых источников энергии не так высок (обычно 10–20 %), а доля в объеме вырабатываемой энергии существенно уступает доли в установленной мощности (рис. 1 и рис. 2).

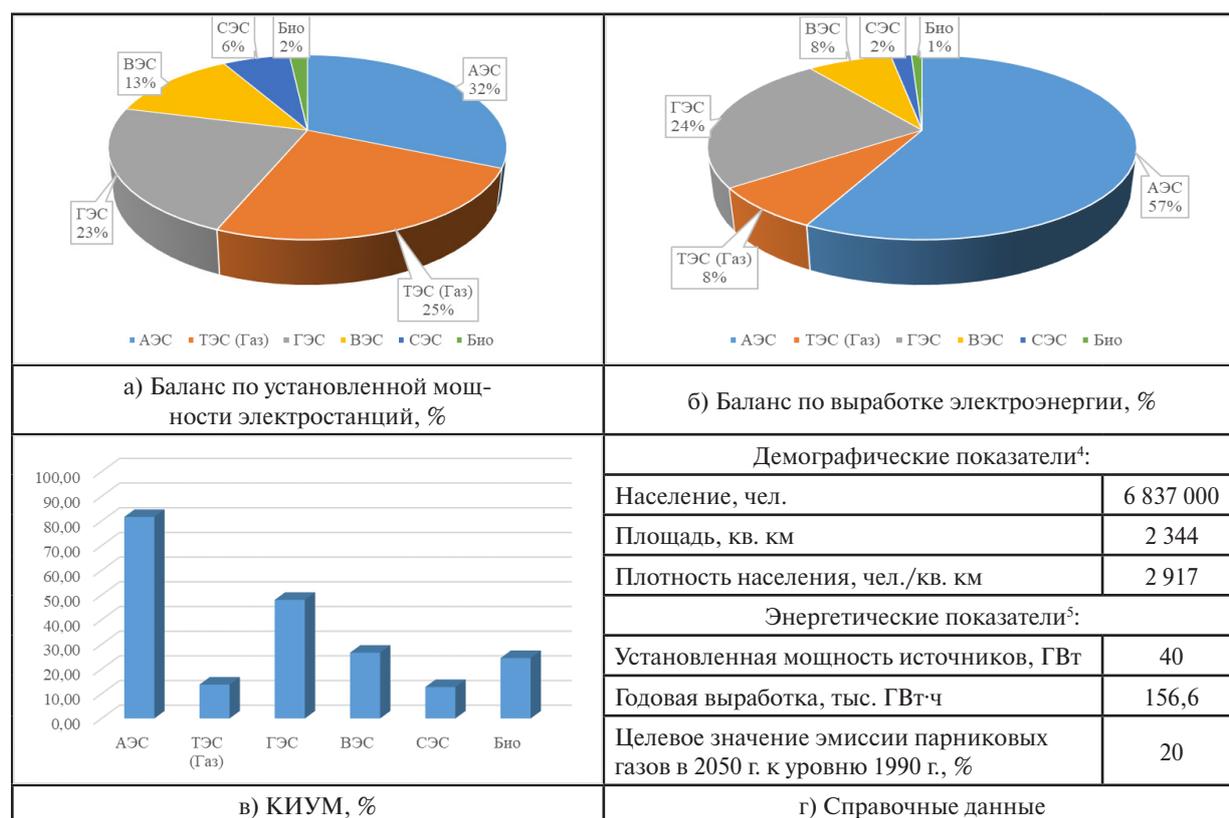


Рис. 1. Энергетический профиль городской агломерации Торонто (Торонто-Гамильтон-Ошава), 2018 г.

Fig. 1. Energy profile of Toronto metropolitan area (Toronto-Hamilton-Oshawa), 2018

¹ CDP Cities, States and Regions Open Data Portal: <https://data.cdp.net/>

² Canada Energy Regulator: <https://www.cer-rec.gc.ca>

³ U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov>

⁴ Demographia World Urban Areas. 2023: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>

⁵ Canada Energy Regulator: <https://www.cer-rec.gc.ca>



Рис. 2. Энергетический профиль городской агломерации Нью-Йорк, 2019 г.

Fig. 2. Energy profile of New York City metropolitan area, 2019

Подобные аспекты необходимо учитывать для адекватной оценки реальных перспектив декарбонизации российской энергетической отрасли, потому как города Северной Америки могут рассматриваться в качестве примеров (как удачных, так и неудачных) реализации стратегии углеродной нейтральности с переходом на возобновляемые источники энергии в силу схожих климатических, энергетических и экономических особенностей Российской Федерации, Канады и США.

Электронный ресурс Metabolism of Cities⁸ обладает обширной базой статистики потребления топливно-энергетических ресурсов городами за последние 20–25 лет с указанием источника информация (как правило, научные публикации в международных рейтинговых журналах). На рис. 3–6 представлены данные по динамике потребления энергии, воды и объему захоронения отходов крупнейшими городами мира, построенные на основании ресурса Metabolism of Cities. Из российских городов в данной выборке присутствует только г. Москва, как единственный населенный пункт в стране с населением свыше 10 млн. человек. Стоит отметить, что для г. Москвы наблюдается самое значительное снижение потребления воды в период 2001–2011 гг. (–46 %) по сравнению с другими городами, большинство из которых отметились существенным приростом по данному показателю. При этом рост потребления энергии российской столицей за рассматриваемый промежуток времени составил +26 %.

Специалисты Технического университета Онтарио составили схожую базу данных по крупнейшим городам мира⁹. В табл. 1 приведены выборочные демографические, энергетические и

⁶ Demographia World Urban Areas. 2023: <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>

⁷ U.S. Department of Energy: <https://www.energy.gov>

⁸ Metabolism of Cities: <https://metabolismofcities.org/>

⁹ Ontario Tech University. Energy and material flows of megacities: <https://ontariotechu.ca/>

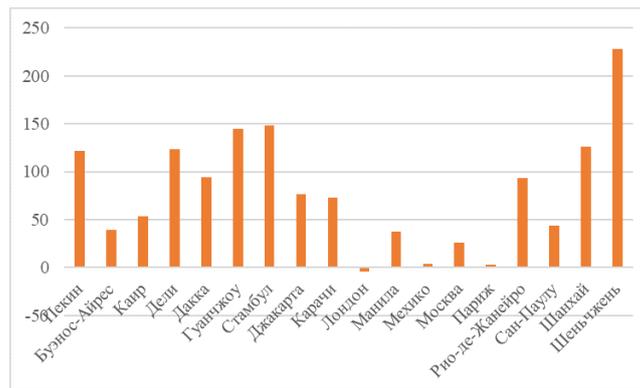


Рис. 3. Динамика потребления энергии стационарными источниками, % 2001–2011 гг.
 Fig. 3. Dynamics of energy consumption by stationary sources, % 2001–2011

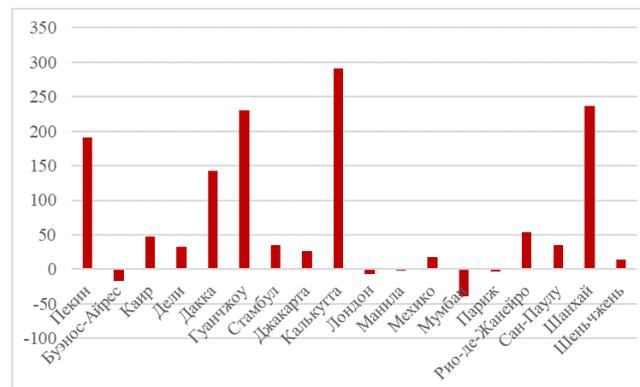


Рис. 4. Динамика потребления энергии транспортом, % 2001–2011 гг.
 Fig. 4. Dynamics of energy consumption by transport, % 2001–2011

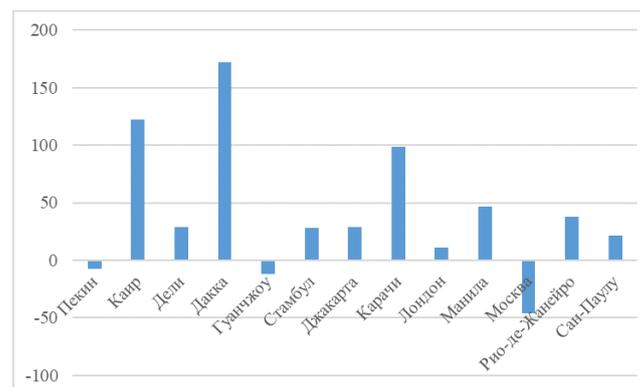


Рис. 5. Динамика потребления воды, % 2001–2011 гг.
 Fig. 5. Dynamics of water consumption, % 2001–2011

экологические показатели, причем для более корректного сравнения приняты данные за 2011 г., т.к. они имеются для всех городов в вышеназванной базе данных.

Важно внести следующие пояснения касаясь данных в табл. 1:

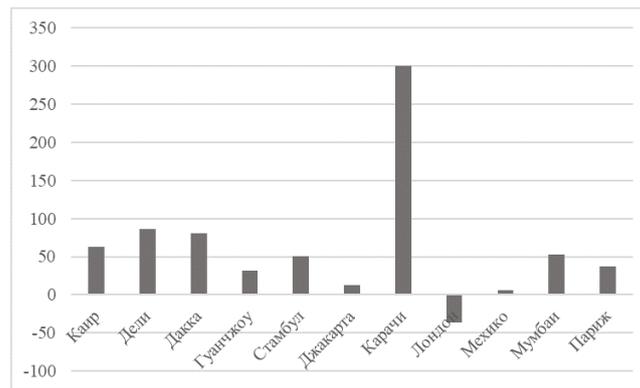


Рис. 6. Динамика захоронения отходов, % 2001–2011 гг.

Fig. 6. Dynamics of waste disposal, % 2001–2011

- графа «Общее потребление энергии» включает как потребление топлива стационарными источниками, так и транспортом;
- графа «Потребление воды» включает суммарное потребление воды городом на все нужды;
- плотность населения рассчитывалась при отнесении на урбанизированную, а не полную площадь города;
- все удельные показатели рассчитывались авторами самостоятельно на основании базы данных.

Этапы выработки решений при стратегическом планировании

После рассмотрения данных, представленных в табл. 1, становится очевидным, что напрямую сравнивать показатели городов не совсем корректно в силу разных промышленных, экономических и инфраструктурных особенностей. В частности, углеродный след мегаполисов ядра капиталистической системы (Токио, Париж) может быть выше, чем у городов в странах, которые принято относить к развивающимся (страны БРИКС). Это обусловлено тем, что подушевой углеродный след характеризует не только технологию генерации электрической энергии, но и численность населения с учетом общего уровня развития промышленности рассматриваемого объекта. По этой причине густонаселенные города Юго-Восточной Азии с доминирующей долей угля в энергобалансе могут оказаться «экологичнее» европейских столиц с современной энергосистемой. Поэтому первым этапом при анализе энергоэкологического метаболизма города предлагается ранжирование городов по уровню метаболизма с точки зрения подушевого потребления энергии (табл. 2).

Второй этап – определение текущих ограничений развития и эволюционных ловушек с учетом уровня метаболизма городов. К примеру, Московская область имеет дефицит по располагаемой электрической мощности, а ряд крупных городов Подмосковья – по располагаемой тепловой мощности. Эти аспекты представляют собой текущие ограничения по развитию города с точки зрения повышения уровня его метаболизма. Другим ограничением, отнесенным скорее к будущему, а не к настоящему являются, так называемые, эволюционные ловушки, с которыми неминуемо столкнется город в ближайшей перспективе при сохранении нынешних социокультурных и экономических моделей развития (рис. 7).

Третий этап – анализ климатической уязвимости объектов энергетической инфраструктуры в контексте влияния динамики изменений температуры, влажности и иных погодных условий на режимы работы энергетического оборудования.

Четвертый этап – построение поточных диаграмм и прогнозирование тепло-, электро-, водо- и топливопотребления. Задача представляет собой визуализацию движения энергетических потоков городской среды.

Таблица 1

Основные показатели крупнейших городов мира

Table 1

Main indicators of the largest cities in the world

Город	Население, чел.	Общая площадь, км ²	Урбаниз. площадь, км ²	Плотн. населения, чел./км ²	Удел. площадь строений, м ² /чел	Потребл. электроэнер., ГВт·ч	Общее потребл. энергии, ТДж	Удел. потребл. электроэнер., кВт·ч/чел	Удел. потребл. энергии, ГДж/чел	Потребл. воды, млн. л.	Удел. потребл. воды, тыс. л./чел
Пекин	20 186 000	16 411	3 377	5 977	40,12	80 686	1 399 001	3 997	69	4 150 800	206
Буэнос-Айрес	12 806 866	3 209	2 477	5 170	—	34 170	688 758	2 668	54	2 186 931	171
Каир	20 495 461	17 393	1 573	13 030	—	30 897	381 568	1 508	19	2 969 258	145
Дели	16 753 235	1 483	1 113	15 052	4,05	21 700	230 222	1 295	14	1 408 500	84
Дакка	15 616 562	1 860	911	17 142	8,09	9 671	396 926	619	25	698 930	45
Гуанчжоу	12 751 400	7 434	—	—	28,99	63 120	1 151 337	4 950	90	7 576 491	594
Стамбул	13 483 052	5 461	5 343	2 523	11,05	38 249	500 195	2 837	37	972 023	72
Джакарта	9 786 372	662	556	17 601	—	35 061	379 645	3 583	39	305 684	31
Карачи	15 500 000	3 527	2 000	7 750	25,89	20 690	317 424	1 335	20	529 900	34
Калькутта	14 112 536	1 887	185	76 284	—	12 383	68 874	877	5	1 382 919	98
Лагос	20 546 999	2 798	1 000	20 547	—	1 600	609 390	78	30	953 924	46
Лондон	8 173 941	1 595	560	14 596	28,39	39 945	713 403	4 887	87	707 266	87
Лос-Анджелес	9 889 000	10 517	—	—	70,00	63 898	1 028 785	6 462	104	3 660 000	370
Манила	11 855 975	636	636	18 641	29,80	49 762	556 932	4 197	47	1 248 090	105
Мехико	8 851 080	1 495	792	11 176	—	13 667	421 394	1 544	48	1 122 400	127
Москва	11 503 501	1 080	737	15 609	—	51 954	1 686 440	4 516	147	1 496 000	130
Мумбаи	12 478 447	603	—	—	—	12 952	107 049	1 038	9	2 070 234	166
Нью-Йорк	22 214 518	—	—	—	—	148 682	2 825 895	6 693	127	10 916 722	491
Осака	17 089 000	—	—	—	55,44	141 335	1 296 336	8 271	76	2 513 774	147
Париж	11 852 851	12 011	2 535	4 676	80,23	68 215	749 196	5 755	63	1 712 297	144
Рио-де-Жанейро	11 909 897	5 328	1 084	10 987	—	33 241	335 322	2 791	28	1 587 242	133
Сан-Паулу	19 822 559	7 947	1 958	10 124	—	53 830	575 582	2 716	29	2 004 998	101
Сеул	10 528 774	606	363	29 005	58,59	46 903	815 311	4 455	77	1 150 338	109
Шанхай	23 474 600	6 340	—	—	41,79	126 913	2 118 862	5 406	90	9 749 000	415
Шэньчжень	10 467 400	2 020	1 992	5 255	—	69 606	357 514	6 650	34	2 005 265	192
Тегеран	12 183 391	18 900	1 390	8 765	—	24 691	1 110 806	2 027	91	1 111 734	91
Токио	35 622 000	—	—	—	48,39	240 783	2 561 871	6 759	72	4 186 440	118



Рис. 7. Типовые ограничения и эволюционные ловушки городов

Fig. 7. Typical constraints and evolutionary traps of cities

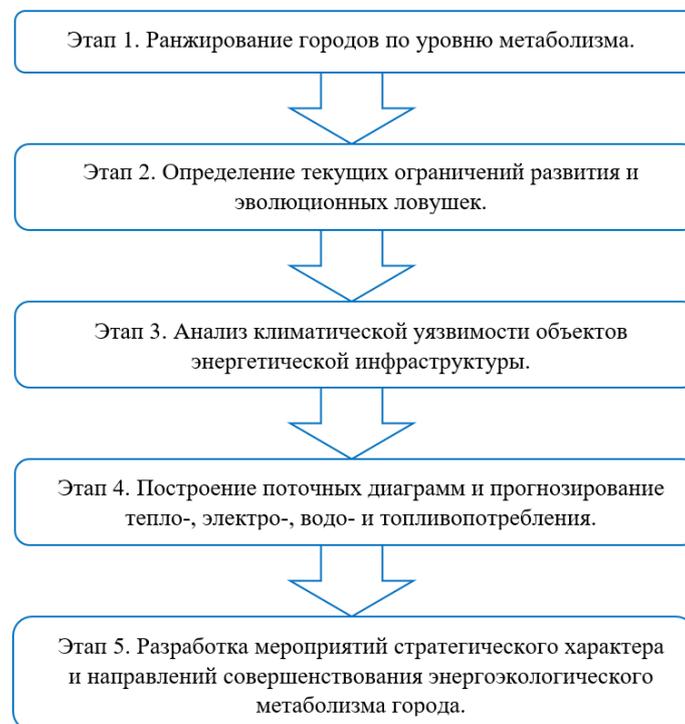


Рис. 8. Методический подход к изучению метаболизма города

Fig. 8. Methodological approach to the study of the urban metabolism

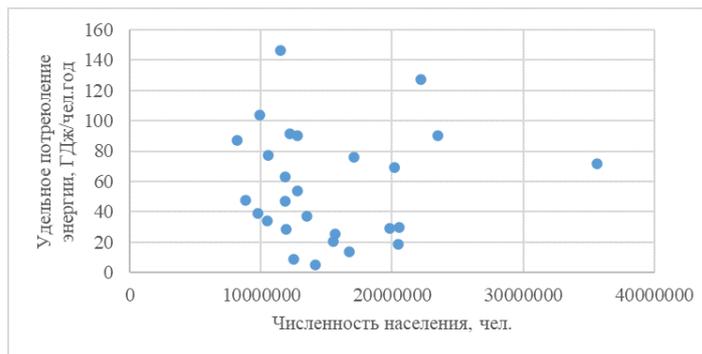


Рис. 9. Зависимость удельного потребления энергии от численности населения (ГДж/чел. от чел.)

Fig. 9. Dependence of specific energy consumption on the population (GJ/person per person)

Таблица 2

Ранжирование мегаполисов по уровню метаболизма

Table 2

Ranking of megacities by metabolic rate

Уровень метаболизма	Примеры городов	Специфика
Крайне низкий (до 10 ГДж/чел·год)	Калькутта, Мумбаи	Высокая плотность населения при отсутствии крупных промышленных потребителей
Низкий (от 10 до 25 ГДж/чел·год)	Каир, Дакка, Дели, Карачи	Потенциальные точки экономического роста с перспективой повышения уровня метаболизма
Средний (от 25 до 70 ГДж/чел·год)	Пекин, Буэнос-Айрес, Стамбул, Джакарта, Лагос, Манила, Мехико, Париж, Рио-де-Жанейро, Сан-Паулу, Шеньчжень	Города со сложившейся энергетической и промышленной структурой, являющиеся экономическими центрами регионов и стран
Высокий (от 70 до 100 ГДж/чел·год)	Гуанчжоу, Лондон, Осака, Сеул, Шанхай, Тегеран, Токио	Столицы, а также крупные промышленные и экономические центры стран с лидирующим вкладом в мировую экономику
Крайней высокий (свыше 100 ГДж/чел·год)	Лос-Анджелес, Москва, Нью-Йорк	Мировые экономические столицы

Пятый этап – разработка мероприятий стратегического характера и направлений совершенствования энергоэкологического метаболизма города с учетом текущего уровня метаболизма. Заключительный этап методологии базируется на результатах работы по предыдущим четырем этапам и предназначен для разработки документа стратегического планирования энергетической инфраструктуры города (рис. 8).

Энергетический предел роста городов

На рис. 9 представлены данные из табл. 1 по удельному потреблению энергии на человека в привязке к численности населения. Стоит отметить, что явной зависимости из множества точек не наблюдается, что обусловлено разными инфраструктурными особенностями городов.

В то же время если придерживаться предложенной классификации уровня метаболизма (табл. 2) и оставить на рисунке только города с высоким и крайне высоким уровне метаболизма: Гуанчжоу, Лондон, Осака, Сеул, Шанхай, Тегеран, Токио, Лос-Анджелес, Москва, Нью-Йорк,



Рис. 10. Зависимость удельного потребления энергии от численности населения (ГДж/чел от чел.) для городов с высоким и крайне высоким уровнем метаболизма

Fig. 10. Dependence of specific energy consumption on the population (GJ/person per person) for cities with high and extremely high metabolic rates

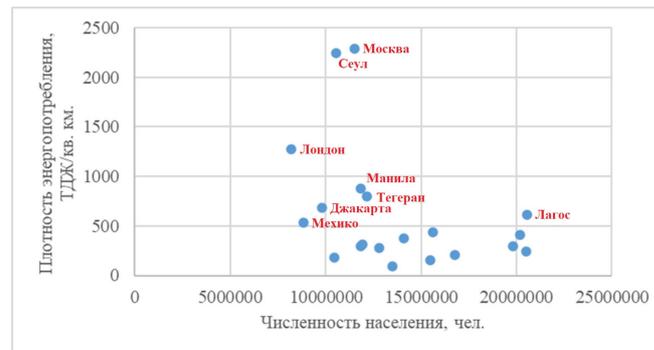


Рис. 11. Зависимость плотности энергопотребления от численности населения (ТДж/км² от чел.)

Fig. 11. Dependence of energy consumption density on the population (TJ/km² per person)

то при достижении численности населения 8–10 млн. человек удельное потребление энергии за редким исключением не растет и составляет около 80 ГДж/чел.·год. Таким образом, дальнейшее разрастание города до 15, 20 или 30 млн. чел. представляет собой повторение существующих практик производства и потребления энергии, что можно классифицировать как энергетический предел роста городов.

Другим показательным критерием является плотность энергопотребления города, величина которого рассчитывается как соотношение общего потребления энергии на урбанизированную площадь. На рис. 11 представлена данная зависимость для городов из табл. 1. Согласно данным на рис. 11, средняя плотность энергопотребления города составляет 500 – 600 ТДж/км², при этом только 3 города: Лондон, Москва и Сеул имеют величину свыше 1000 ТДж/км². При этом явная связь между плотностью энергопотребления, уровнем метаболизма и численностью населения не прослеживается. В группе городов с величиной свыше 500 ТДж/км² присутствуют очень непохожие по энергетической, экономической, климатической и социальной специфике населенные пункты: Москва, Сеул, Лондон, Мехико, Лагос и др.

В свою очередь, наблюдается растущая зависимость плотности энергопотребления от плотности населения (рис. 12). Из тенденций явно выбивается только Калькутта, обладающая крайне высокой плотностью населения (76284 чел./км²) при малом уровне метаболизма (5 ГДж/чел.).

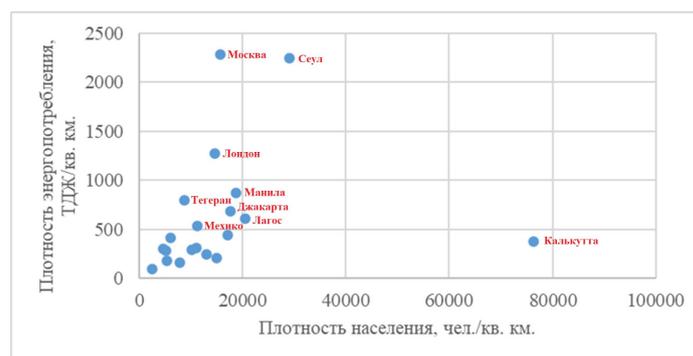


Рис. 12. Зависимость плотности энергопотребления от плотности населения (ТДж/км² от чел/км²)

Fig. 12. Dependence of energy consumption density on population density (TJ/km² from people/km²)

Заклучение

Зачастую под стратегическим планированием городского развития подразумевается метод обеспечения конкурентоспособности города в условиях глобализации и с акцентом на социально-экономические показатели. Однако, с учетом современных климатических и инфраструктурных вызовов стратегическое планирование города является многомерной и многоуровневой задачей, охватывающей взаимосвязанные аспекты жизни человека и поэтому может быть решена исключительно в разрезе междисциплинарного научного подхода.

В качестве перспективных задач с точки зрения исследования энергоэкологического метаболизма городов стоит выделить:

- Расчет топливно-энергетических балансов городов с учетом динамики в разрезе последних 10–25 лет.
- Разработка перечня абсолютных и удельных критериев для типологизации городов.
- Построение моделей прогнозирования уровня метаболизма и перечня мероприятий стратегического характера для групп городов со схожим энергетическим и экологическим профилем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Xie W., Yang X., Han Z., Sun M., Li Y., Xie H., Yu H., Chen B., Fath B., Wang Y. Urban sector land use metabolism reveals inequalities across cities and inverse virtual land flows. *Resources, Conservation and Recycling* Volume 202, March 2024, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107394>

[2] Perlaza Rodriguez J.M., Grazia Guida A., Diaz Marquez A.M. Urban metabolism of human settlements in small island-protected environments. *Environmental and Sustainability Indicators* Volume 21, February 2024, 100324. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100324>

[3] Bahers J.-B., Athanassiadis A., Perrotti D., Kampelmann S. The place of space in urban metabolism research: Towards a spatial turn? A review and future agenda. *Landscape and Urban Planning* Volume 221, May 2022, 104376. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104376>

[4] Wang X., Tan X., Gao M., Zhang Y. A review of a series of effective methods in urban metabolism: Material flow, ecological network and factor analysis. *Sustainable Production and Consumption* Volume 39, July 2023, PP. 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.017>

[5] Ning X., Qui Y., Du X., Xing K. Multi-sectoral based innovative approach for evaluating human well-being efficiency of urban metabolism. *Sustainable Cities and Society* Available online 26 January 2024, 105238. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105238>

- [6] **Ермолаева П.О.** Социально-экологический метаболизм городов: концептуализация, научные школы, современные зарубежные исследования // Социологическая наука и социальная практика. – 2015. – № 3 (11). – С. 34–50. – EDN UHWOUB.
- [7] **Wolman A.** The metabolism of cities: Scientific American 213 (3), 179–190, 1965.
- [8] **Odum H.T.** Systems Ecology, an Introduction: Wiley-Interscience, New York, NY, 1983.
- [9] **Xu L., Du H., Zhang X.** A classification approach for urban metabolism using the CART model and its application in China. Ecological Indicators 123 (2021) 107345.
- [10] **Cardenas-Mamani U., Perrotti D.** Understanding the contribution of ecosystem services to urban metabolism assessments: An integrated framework. Ecological Indicators 136 (2022) 108593.
- [11] **Peponi A., Morgado P., Kumble P.** Life cycle thinking and machine learning for urban metabolism assessment and prediction. Sustainable Cities and Society 80 (2022) 103754.
- [12] **Bahers J.-B., Rosado L.** The material footprints of cities and importance of resource use indicators for urban circular economy policies: A comparison of urban metabolisms of Nantes-Saint-Nazaire and Gothenburg. Cleaner Production Letters 4 (2023) 100029.
- [13] **Fath B.D., Strelkovskii N., Wang S., Chen B.** Assessing urban carbon metabolism using network analysis across Chinese and European cities. Cleaner Production Letters 4 (2023) 100042.
- [14] **Kennedy C. Pincetl S., Bunje P.** The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. Environmental Pollution 159 (2011) 1965–1973.
- [15] **Paul R., Kenway S., McIntosh B., Mukheibir P.** Urban Metabolism of Bangalore City: A Water Mass Balance Analysis: Urban Water Metabolism of Bangalore City. Journal of Industrial Ecology. 22. 10.1111/jiec.12705.
- [16] **Zaheer A.** A theoretical application of the Extended Metabolism Model in Port Louis in a bid to promote urban sustainability (2017).
- [17] **Carreon J.R., Worrell E.** Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism. Resources, Conservation & Recycling 132 (2018) 258–266.
- [18] **Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Бартенев А.И., Калякин И.Д., Яшин А.П.** Стратегическое планирование развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса. СОК. № 9. 2022. С. 72–79.
- [19] **Kennedy C.A., Stewart I., Facchini A., Cersosimo I., Mele R., Chen B., Uda M., Kansal A., Chiu A., Kim K.G., Dubeux C., Lebre La Rovere E., Cunha B., Pincetl S., Keirstead J., Barles S., Pusaka S., Gunawan J., Adegbile M., Nazariha M., Hoque S., Marcotullio P.J., González Otharán F., Genena T., Ibrahim N., Farooqui R., Cervantes G., Sahin A.D.** Energy and material flows of megacities. Proc Natl Acad Sci U S A. 2015 May 12; 112 (19): 5985-90. DOI: 10.1073/pnas.1504315112. Epub 2015 Apr 27.
- [20] **Fernandes R., De Oliveira Junior S., Keutenedjan Mady C.E.** Sao Paulo state exergy analysis. Proceedings of ENCIT 2016 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2016.CIT2016-0013

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДЮХИН Александр Валерьевич – доцент, Национальный исследовательский университет "МЭИ", канд. техн. наук.
E-mail: FedyukhinAV@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-0450>

ГАШО Евгений Геннадьевич – профессор, Национальный исследовательский университет "МЭИ", д-р техн. наук.
E-mail: 290461@bk.ru

REFERENCES

- [1] **W. Xie, X. Yang, Z. Han, M. Sun, Y. Li, H. Xie, H. Yu, B. Chen, B. Fath, Y. Wang**, Urban sector land use metabolism reveals inequalities across cities and inverse virtual land flows. *Resources, Conservation and Recycling* Volume 202, March 2024, 107394. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107394>
- [2] **J.M. Perlaza Rodriguez, A. Grazia Guida, A.M. Diaz Marquez**, Urban metabolism of human settlements in small island-protected environments. *Environmental and Sustainability Indicators* Volume 21, February 2024, 100324. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100324>
- [3] **J.-B. Bahers, A. Athanassiadis, D. Perrotti, S. Kampelmann**, The place of space in urban metabolism research: Towards a spatial turn? A review and future agenda. *Landscape and Urban Planning* Volume 221, May 2022, 104376. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104376>
- [4] **X. Wang, X. Tan, M. Gao, Y. Zhang**, A review of a series of effective methods in urban metabolism: Material flow, ecological network and factor analysis. *Sustainable Production and Consumption* Volume 39, July 2023, Pp. 162–174. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.05.017>
- [5] **X. Ning, Y. Qui, X. Du, K. Xing**, Multi-sectoral based innovative approach for evaluating human well-being efficiency of urban metabolism. *Sustainable Cities and Society* Available online 26 January 2024, 105238. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105238>
- [6] **P.O. Yermolayeva**, Sotsialno-ekologicheskii metabolizm gorodov: kontseptualizatsiya, nauchnyye shkoly, sovremennyye zarubezhnyye issledovaniya // Sotsiologicheskaya nauka i sotsialnaya praktika. – 2015. – № 3 (11). – S. 34–50. – EDN UHWOUB.
- [7] **A. Wolman**, The metabolism of cities: *Scientific American* 213 (3), 179–190, 1965.
- [8] **H.T. Odum**, *Systems Ecology, an Introduction*: Wiley-Interscience, New York, NY, 1983.
- [9] **L. Xu, H. Du, X. Zhang**, A classification approach for urban metabolism using the CART model and its application in China. *Ecological Indicators* 123 (2021) 107345.
- [10] **U. Cardenas-Mamani, D. Perrotti**, Understanding the contribution of ecosystem services to urban metabolism assessments: An integrated framework. *Ecological Indicators* 136 (2022) 108593.
- [11] **A. Peponi, P. Morgado, P. Kumble**, Life cycle thinking and machine learning for urban metabolism assessment and prediction. *Sustainable Cities and Society* 80 (2022) 103754.
- [12] **J.-B. Bahers, L. Rosado**, The material footprints of cities and importance of resource use indicators for urban circular economy policies: A comparison of urban metabolisms of Nantes-Saint-Nazaire and Gothenburg. *Cleaner Production Letters* 4 (2023) 100029.
- [13] **B.D. Fath, N. Strelkovskii, S. Wang, B. Chen**, Assessing urban carbon metabolism using network analysis across Chinese and European cities. *Cleaner Production Letters* 4 (2023) 100042.
- [14] **C. Kennedy, S. Pincetl, P. Bunje**, The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution* 159 (2011) 1965–1973.
- [15] **R. Paul, S. Kenway, B. McIntosh, P. Mukheibir**, Urban Metabolism of Bangalore City: A Water Mass Balance Analysis: Urban Water Metabolism of Bangalore City. *Journal of Industrial Ecology*. 22. 10.1111/jiec.12705.
- [16] **A. Zaheer**, A theoretical application of the Extended Metabolism Model in Port Louis in a bid to promote urban sustainability (2017).
- [17] **J.R. Carreon, E. Worrell**, Urban energy systems within the transition to sustainable development. A research agenda for urban metabolism. *Resources, Conservation & Recycling* 132 (2018) 258–266.
- [18] **Yu.V. Yavorovskiy, I.A. Sultanguzin, A.I. Bartenev, I.D. Kalyakin, A.P. Yashin**, Strategicheskoye planirovaniye razvitiya goroda na osnove modelirovaniya i optimizatsii toplivno-energeticheskogo balansa. *SOK*. № 9. 2022. S. 72–79.
- [19] **C.A. Kennedy, I. Stewart, A. Facchini, I. Cersosimo, R. Mele, B. Chen, M. Uda, A. Kansal, A. Chiu, K.G. Kim, C. Dubeux, E. Lebre La Rovere, B. Cunha, S. Pincetl, J. Keirstead, S. Barles, S. Pusaka, J. Gunawan, M. Adegbile, M. Nazariha, S. Hoque, P.J. Marcotullio, F. González Otharán, T. Genena, N. Ibrahim**,

R. Farooqui, G. Cervantes, A.D. Sahin, Energy and material flows of megacities. Proc Natl Acad Sci U S A. 2015 May 12; 112 (19): 5985-90. DOI: 10.1073/pnas.1504315112. Epub 2015 Apr 27.

[20] **R. Fernandes, S. De Oliveira Junior, C.E. Keutenedjan Mady**, Sao Paolo state exergy analysis. Proceedings of ENCIT 2016 16th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. DOI: 10.26678/ABCM.ENCIT2016.CIT2016-0013

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Alexander V. FEDYUKHIN – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.

E-mail: FedyukhinAV@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1819-0450>

Evgeniy G. GASHO – *National Research University "Moscow Power Engineering Institute"*.

E-mail: 290461@bk.ru

Поступила: 28.01.2024; Одобрена: 23.02.2024; Принята: 23.02.2024.

Submitted: 28.01.2024; Approved: 23.02.2024; Accepted: 23.02.2024.

Научная статья

УДК 621.355

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30106>



А.О. Дителева ✉, *В.В. Слепцов*, *Д.Ю. Кукушкин*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

✉ anna.diteleva@mail.ru

ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ГИБРИДНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Аннотация. Данная работа посвящена разработке тонкопленочной технологии изготовления перспективного электродного материала на основе высокопористой углеродной матрицы. Представлена разработанная конструкция электродного материала на основе высокопористой углеродной матрицы для накопителей энергии с двойным электрическим слоем и для гибридных конденсаторов, в которых энергия накапливается как в двойном электрическом слое, так и за счет протекания электрохимических реакций. Показано, что разработанная тонкопленочная технология имеет большую перспективу роста энергоемкости в отличие от традиционной толстопленочной, а также позволяет создавать конденсаторные ячейки с параметрами, превышающими параметры существующих суперконденсаторов (ионисторов). Также показана перспектива использования разработанной конструкции электродного материала и тонкопленочной технологии для гибридных конденсаторов с удельной энергоемкостью свыше 300 Вт·ч/кг.

Ключевые слова: электродные материалы, гибридный конденсатор, наночастицы, накопитель энергии, углеродное волокно, высокопористая матрица.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, номер темы FSFF-2023-0008.

Для цитирования:

Дителева А.О., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю. Тонкопленочная технология создания перспективных электродных материалов гибридных конденсаторов // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 108–116. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30106>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30106>*A.O. Diteleva* ✉, *V.V. Sleptsov*, *D.Yu. Kukushkin*

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

✉ anna.diteleva@mail.ru

THIN-FILM TECHNOLOGY FOR THE CREATION OF PROMISING ELECTRODE MATERIALS FOR HYBRID CAPACITORS

Abstract. This work is devoted to the development of a thin-film technology for manufacturing a promising electrode material based on a highly porous carbon matrix. The paper presents the developed design of an electrode material based on a highly porous carbon material for energy storage devices with a double electric layer and for hybrid capacitors in which energy is accumulated both in a double electric layer and due to electrochemical reactions. It is shown that the developed thin-film technology is very promising for the purpose of increasing energy intensity in contrast to the traditional thick-film technology, and also allows you to create capacitor cells with parameters exceeding the parameters of existing supercapacitors (ionistors). The prospect of using the developed electrode material design and thin-film technology for hybrid capacitors with a specific energy consumption of over 300 Wh/kg is also shown.

Keywords: electrode materials, hybrid capacitor, nanoparticles, energy storage, carbon fiber, highly porous matrix.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia, topic number FSFF-2023-0008.

Citation:

A.O. Diteleva, V.V. Sleptsov, D.Yu. Kukushkin, Thin-film technology for the creation of promising electrode materials for hybrid capacitors, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 108–116, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30106>

Введение. В современном мире с каждым днем возрастает потребность в энергоэффективных накопителях энергии. Особенно актуально это в отношении химических источников тока и ионисторов (суперконденсаторов). Однако традиционная толсто пленочная технология, которая используется для их производства, уже не обеспечивает необходимого роста энергоемкости, и также наблюдается тенденция снижения параметров из-за повышения уровня безопасности ячеек. Удельная энергоемкость достигнутая у литиевых химических источников тока (ХИТ) составляет 260 Вт·ч/кг, у суперконденсаторов – 5–10 Вт·ч/кг [1–4]. В связи с этим, необходимы новые подходы к производству таких устройств. Развитие аккумуляторов для достижения удельной энергоемкости более 300 Вт·ч/кг сейчас необходимо вести в сторону развития поколения аккумуляторов на основе высокопористых матриц, заполненных химически активным материалом.

Высокую перспективу помимо углеродных материалов имеют электроды на основе титанатов лития, характеризующихся повышенной безопасностью эксплуатации и высокой циклической собранностью (около 7000 циклов). Подходом для увеличения энергоемкости накопителей энергии является использование наноструктурированных материалов. Такие материалы имеют большую поверхность, что способствует более эффективному взаимодействию с ионами и увеличению энергоемкости ионистора. Кроме того, наноструктурированные материалы обладают высокой механической прочностью и устойчивостью к циклическим процессам. Усовершенствованные

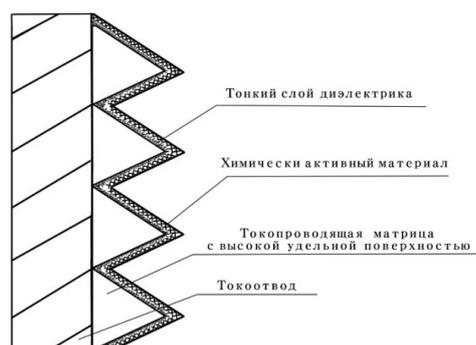


Рис. 1. Модель перспективного электродного материала гибридного конденсатора

Fig. 1. Model of a promising electrode material of a hybrid capacitor

электроды на основе титанатов лития могут представлять наночастицы титаната с углеродным слоем или углеродную матрицу наноструктурированную наночастицами титаната [5–9]. Также одним из развивающихся направлений выделяют разработку гибридных накопителей энергии, сочетающие в себе достоинства суперконденсаторов и ХИТ. Энергия в таких устройствах накапливается в двойном электрическом слое как в суперконденсаторах, так и за счёт протекания электрохимического процесса как в ХИТ. Таким образом, разработка новых электродных материалов и технологий их изготовления является важным направлением для улучшения параметров существующих накопителей энергии [10–13].

Поэтому целью работы являлась разработка основ создания перспективного электродного материала гибридного конденсатора и тонкопленочной технологии его изготовления, обеспечивающих возможность накопления электрической энергии свыше 300 Вт·ч/кг.

Методы и материалы

Для разработки конструкции перспективного гибридного конденсатора была разработана физическая модель [14], показывающая, что энергия гибридного конденсатора зависит как от энергии в двойном электрическом слое (ДЭС), так от протекания электрохимического процесса и потерь энергии за счет внутреннего сопротивления. Подходом для разработки электродов гибридного конденсатора являлось применение матрицы с высокой удельной поверхностью, в поры которой можно было бы встроить наночастицы химически активного материала. Для получения высокой энергоёмкости удельная поверхность матрицы должна быть более 1000 м²/г, также необходимо обеспечить низкое внутреннее сопротивление. Дополнительный потенциал роста удельной энергии обеспечивает двойной электрический слой с высокой диэлектрической проницаемостью на уровне 10⁴ и выше. Для изготовления такого электродного материала необходима технология, позволяющая работать с наноструктурами и высокопористыми материалами, т.е. тонкопленочная технология.

Предлагаемая модель электродного материала гибридного конденсатора представлена на рис. 1. В качестве высокопористой матрицы использовалось углеродное волокно «Бусофит» производства «Химволокно» (Белоруссия). Удельная поверхность материала составляет 1200 м²/г.

Для повышения проводимости углеродного материала типа «Бусофит» была проведена его металлизация титаном по магнетронной технологии на рулонной установке УМРМ-1. Выбор титана связан с тем, что при дополнительной обработке металлизированного титаном углеродного волокна «Бусофит» возможно получение слоя полититанатов натрия и калия, характеризующиеся высокой диэлектрической проницаемостью более 10⁶. Толщина покрытия титаном углеродного волокна составила ~ 2 мкм. Металлизированное титаном углеродное волокно «Бусофит» и нить металлизированного титаном углеродного волокна «Бусофит», представлены на рис. 2 и 3.

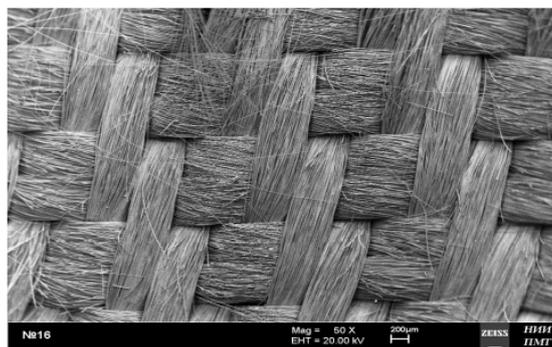


Рис. 2. Металлизированное титаном углеродное волокно «Бусофит»

Fig. 2. Titanium metallized carbon fiber "Busofit"

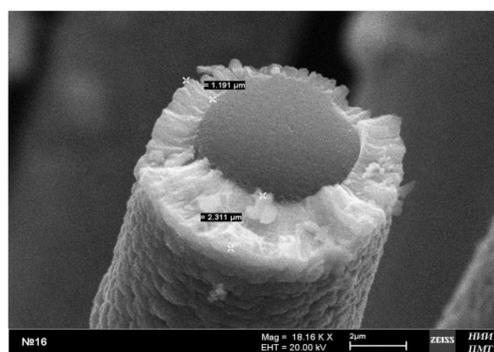


Рис. 3. Нить металлизированного титаном углеродного волокна «Бусофит» (2,311 мкм)

Fig. 3. A thread of titanium metallized carbon fiber "Busofit" (2.311 μm)

Для формирования нужной наноструктуры и возможности ее заполнения химически активным материалом, была разработана электроимпульсная установка, позволяющая одновременно получать наночастиц необходимых металлов и осаждать их в матрицу углеродного волокна «Бусофит». Одним из основных элементов установки являются электродная система, материал электродов соответствует получаемым и осаждаемым наночастицам. В основе механизма получения наночастиц лежит электрогидравлический удар, заключающийся в образовании пузырька газа при приложении импульсного напряжения ($4 \div 10$ кВ) между электродами, электроимпульсного разряда с выделением наночастиц металла в дистиллированную воду и последующим схлопыванием пузырька газа. Наночастицы металлов позиционируются внутрь углеродного материала, который крепится на оснастку вокруг электродов установки. По тонкопленочной технологии были получены электродные материалы с наночастицами серебра (рис. 4), магния, цинка и алюминия, размер которых 20–45 нм. Электроимпульсная установка позволяет наноструктурировать высокопористые материалы различными металлами, которыми в том числе могут быть и химически активные материалы.

Углеродный материал типа «Бусофит» металлизированный титаном был обработан в кислотных и щелочных растворах и модифицирован железом [15–16], что позволило получить на поверхности титана оксидной диэлектрической пленки и слоя полититаната калия. Диэлектрическая проницаемость (рис. 5) такого материала составила около 10^6 . Циклирование конденсаторных ячеек (рис. 6) на основе такого электродного материала показало устойчивую работу при 6 В.

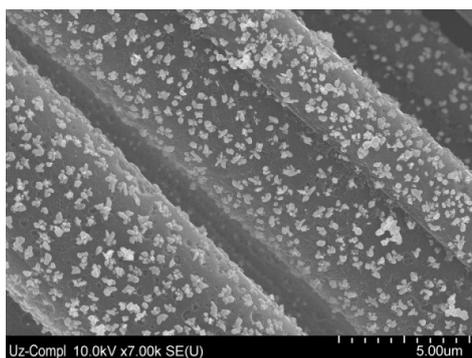


Рис. 4. Металлизированное титаном углеродное волокно «Бусофит» с наночастицами серебра по тонкопленочной технологии

Fig. 4. Titanium metallized carbon fiber "Busofit" with silver nanoparticles using thin-film technology

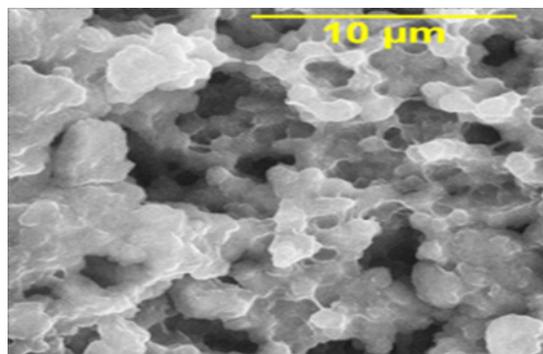


Рис. 5. Модифицированная поверхность пленки титана с полититанатом калия

Fig. 5. Modified titanium film surface with potassium polytitanate

Таким образом, разработанная тонкопленочная технология включает в себя магнетронное осаждение слоя титана и электроимпульсное формирование наноструктур в высокопористой матрице. В итоге тонкопленочная технология позволяет создавать наноструктурированные электродные материалы с высокой удельной поверхностью и высокой диэлектрической проницаемостью для гибридных конденсаторов.

На основе разработанных электродных материалов были изготовлены и исследованы однослойные конденсаторные ячейки на неводном и водном электролитах без добавления химически активного материала. Для ячеек с неводным электролитом в качестве сепаратора использовалась мембрана из фторопласта-4Д, для ячеек с водным электролитом конденсаторная бумага. Токосъемниками являлась титановая фольга Вt1-0. Неводный электролит состоял из перхлората лития и пропилен карбоната. Водный электролит изготавливался из дистиллированной воды и хлорида натрия. Электродные материалы пропитывались электролитом в вакуумной установке для пропитки УВС 33.079.001. Электрические характеристики и тестирование ячеек проводились на лабораторном стенде для исследовательских многоциклических испытаний ЭСК-2.21.

Результаты

Удельная энергоёмкость конденсаторной ячейки с металлизированными титаном электродами (без слоя полититаната калия) составила $\sim 4,9$ Вт·ч/кг при рабочем напряжении 2,5В на

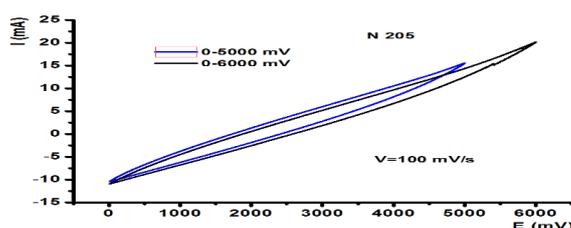


Рис. 6. Циклическая вольтамперограмма конденсатора с модифицированными титаном электродами
 Fig. 6. Cyclic voltammogram of a capacitor with titanium-modified electrodes

водном электролите. Удельная энергоёмкость конденсаторной ячейки с металлизированными титаном электродами и наноструктурированной наночастицами серебра (без слоя полититаната калия) составила $\sim 5,6$ Вт·ч/кг при рабочем напряжении 2,5В на водном электролите. На неводном электролите удельная энергоёмкость конденсаторной ячейки с металлизированными титаном электродами (без слоя полититаната калия) составила ~ 21 Вт·ч/кг при рабочем напряжении 4,5В. Циклирование ячеек с электродным материалом, содержащим слой полититаната калия, показало их устойчивую работу при 6В. Полученные параметры ячеек превышают удельную энергоёмкость существующих суперконденсаторов (ионисторов) в несколько раз, что говорит о перспективности разработанной конструкции электродного материала и тонкопленочной технологии.

Обсуждение

Для получения удельной энергоёмкости, превышающей удельную энергоёмкость существующих химических источников тока, было рассчитано, что при добавлении в разработанную конструкцию электродного материала с диэлектрической проницаемостью 10^2 химически активного материала NCA теоретическая удельная энергоёмкость таких гибридных конденсаторов составит ~ 600 Вт·ч/кг на полимерном электролите. При повышении рабочего напряжения за счет слоя полититаната калия до 6В удельная энергоёмкость может достичь ~ 1000 Вт·ч/кг. Ячейка с такой конструкцией является гибридным конденсатором, и энергия в ней накапливается как в ДЭС, так и за счет протекания химических реакций.

Выводы

Развитие накопителей энергии стоит вести в сторону гибридных конденсаторов. Рост удельной энергоёмкости и безопасности эксплуатации в них достигается за счёт применения электродных материалов на основе углеродной матрицы с высокой удельной поверхностью (более 1000 м²/г), в которой встроен химически активный наноструктурированный материал, а энергия накапливается за счёт протекания электрохимического процесса и в двойном электрическом слое (ДЭС). Дополнительный потенциал роста удельной энергии обеспечивает двойной электрический слой с высокой диэлектрической проницаемостью на уровне 10^4 и выше. Создание такого электродного материала возможно по тонкопленочной технологии. Гибридный конденсатор, созданный на основе разработанных электродных материалов по тонкопленочной технологии, может обеспечить удельную энергоёмкость свыше 300 Вт·час/кг.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Feiyang Zhan, Huayu Wang, Qingqing He, Weili Xu. Metal–organic frameworks and their derivatives for metal-ion (Li, Na, K and Zn) hybrid capacitors, Chem. Sci. 13 (2022) 11981–12015.

- [2] **Ji Ung Choi, Voronina N.** Recent progress and perspective of advanced high-energy co-less ni-rich cathodes for li-ion batteries: yesterday, today, and tomorrow, *Adv. Energy Mater.* 10 (42) (2020) 2027.
- [3] **Hiroyuki Itoi, Miku Matsuura, Yuichiro Tanabe.** High utilization efficiencies of alkylbenzokynones hybridized inside the pores of activated carbon for electrochemical capacitor electrodes, *RSC Adv.* 13 (2023) 2587–2599.
- [4] **Shuai Wang, Cao Yang, Xiaomeng Li, Hanyu Jia.** Polymer-based dielectrics with high permittivity and low dielectric loss for flexible electronics, *J. Mater. Chem. C.* 10 (2022) 6196–6221.
- [5] **Xintong Ren, Nan Meng, Leonardo Ventura, Stergios Goutianos.** Ultra-high energy density integrated polymer dielectric capacitors, *J. Mater. Chem. A.* 10 (2022) 10171–10180.
- [6] **Kai Yang, Lei Hu, Yi Wang, Jianxing Xia, Mengxuan Sun.** Redox-active sodium 3,4-dihydroxy anthraquinone-2-sulfonate anchored on reduced graphene oxide for high-performance Zn-ion hybrid capacitors, *J. Mater. Chem. A.* 10 (2022) 12532–12543.
- [7] **Reitz C., Breitung B., Schneider A., Wang D., Von L.M.** Hierarchical carbon with high nitrogen doping level: a versatile anode and cathode host material for long-life lithium-ion and lithium-sulfur batteries, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 8 (16) (2016) 10274–10282.
- [8] **Hui Shao, Yih-Chyng Wu.** Nanoporous carbon for electrochemical capacitive energy storage, *Chem. Soc. Rev.* 49 (2020) 3005–3039.
- [9] **Andres Velasco, Yu Kyoung Ryu.** Recent trends in graphene supercapacitors: from large area to microsupercapacitors, *Sustainable Energy Fuels.* 5 (2021) 1235–1254.
- [10] **Xiaoyang Deng, Jiajun Li, Liying Ma, Junwei Sha, Naiqin Zhao.** Three-dimensional porous carbon materials and their composites as electrodes for electrochemical energy storage systems, *Mater. Chem. Front.* 3 (2019) 2221–2245.
- [11] **Wenxu Shang, Wentao Yu, Peng Tan, Bin Chen, Zhen Wu, Haoran Xud, Meng Ni.** Achieving high energy density and efficiency through integration: progress in hybrid zinc batteries, *J. Mater. Chem. A.* 7 (2019) 15564–15574.
- [12] **Taehoon Kim, Wentao Song, Yong So, Yabing Qi.** Lium-ion batteries: outloo and hybridized technologies, *J. Mater. Chem. A.* 7 (2019) 292.
- [13] **Chernysheva M.N., Rychagov A.Yu., Kornilov D.Yu., Tkachev S.V., Gubin S.P.** Investigation of sulfuric acid intercalation into thermally expanded graphite in order to optimize the synthesis of electrochemical graphene oxide, *Journal of Electroanalytical Chemistry.* 858 (2020) 113774.
- [14] **Слещов В.В., Гоффман В.Г., Дителева А.О., Ревенок Т.В., Дителева Е.О.** Физическая модель электродного материала для гибридных конденсаторов // *Физикохимия поверхности и защита материалов.* 2023. Т. 59. № 2. С. 1–6.
- [15] **Гоффман В.Г., Слещов В.В., Гороховский А.В., Горшков Н.В., Ковынёва Н.Н., Севрюгин А.В., Видулова М.А., Байняшев А.М., Макарова А.Д., Ч. Зо Лвин.** Накопители энергии с бусофитовыми электродами, модифицированными титаном // *Электрохимическая энергетика.* 2020. Т. 20, № 1, С. 20–32.
- [16] **Varezhnikov L.M., Fedorov F.S., Burmistrov I.N., Plugin I.A., Sommer M., Lashkov A.V., Gorokhovskiy A.V., Nasibulin A.G., Kuznetsov D.V., Gorshenkov M.V., Sysoev V.V.** The room-temperature chemiresistive properties of potassium titanate whiskers versus organic vapors, *Nanomaterials.* 7 (12) (2017) 455–463.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДИТЕЛЕВА Анна Олеговна – старший преподаватель, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», канд. техн. наук.
E-mail: anna.diteleva@mail.ru

СЛЕПЦОВ Владимир Владимирович — заведующий кафедрой, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», д-р техн. наук.

E-mail: 08fraktal@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1171-336X>

КУКУШКИН Дмитрий Юрьевич — доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», канд. техн. наук.

E-mail: skyline34@nxt.ru

REFERENCES

- [1] **Feiyang Zhan, Huayu Wang, Qingqing He, Weili Xu**, Metal–organic frameworks and their derivatives for metal-ion (Li, Na, K and Zn) hybrid capacitors, *Chem. Sci.* 13 (2022) 11981–12015.
- [2] **Ji Ung Choi, N. Voronina**, Recent progress and perspective of advanced high-energy co-less ni-rich cathodes for li-ion batteries: yesterday, today, and tomorrow, *Adv. Energy Mater.* 10 (42) (2020) 2027.
- [3] **Hiroyuki Itoi, Miku Matsuura, Yuichiro Tanabe**, High utilization efficiencies of alkylbenzokynones hybridized inside the pores of activated carbon for electrochemical capacitor electrodes, *RSC Adv.* 13 (2023) 2587–2599.
- [4] **Shuai Wang, Cao Yang, Xiaomeng Li, Hanyu Jia**, Polymer-based dielectrics with high permittivity and low dielectric loss for flexible electronics, *J. Mater. Chem. C.* 10 (2022) 6196–6221.
- [5] **Xintong Ren, Nan Meng, Leonardo Ventura, Stergios Goutianos**, Ultra-high energy density integrated polymer dielectric capacitors, *J. Mater. Chem. A.* 10 (2022) 10171010180.
- [6] **Kai Yang, Lei Hu, Yi Wang, Jianxing Xia**, Mengxuan Sun, Redox-active sodium 3,4-dihydroxy anthraquinone-2-sulfonate anchored on reduced graphene oxide for high-performance Zn-ion hybrid capacitors, *J. Mater. Chem. A.* 10 (2022) 12532–12543.
- [7] **C. Reitz, B. Breitung, A. Schneider, D. Wang, L.M. Von**, Hierarchical carbon with high nitrogen doping level: a versatile anode and cathode host material for long-life lithium-ion and lithium-sulfur batteries, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 8 (16) (2016) 10274–10282.
- [8] **Hui Shao, Yih-Chyng Wu**, Nanoporous carbon for electrochemical capacitive energy storage, *Chem. Soc. Rev.* 49 (2020) 3005–3039.
- [9] **Andres Velasco, Yu Kyoung Ryu**, Recent trends in graphene supercapacitors: from large area to microsupercapacitors, *Sustainable Energy Fuels.* 5 (2021) 1235–1254.
- [10] **Xiaoyang Deng, Jiajun Li, Liying Ma, Junwei Sha, Naiqin Zhao**, Three-dimensional porous carbon materials and their composites as electrodes for electrochemical energy storage systems, *Mater. Chem. Front.* 3 (2019) 2221–2245.
- [11] **Wenxu Shang, Wentao Yu, Peng Tan, Bin Chen, Zhen Wu, Haoran Xud, Meng Ni**, Achieving high energy density and efficiency through integration: progress in hybrid zinc batteries, *J. Mater. Chem. A.* 7 (2019) 15564–15574.
- [12] **Taehoon Kim, Wentao Song, Yong So, Yabing Qi**, Linium-ion batteries: outloo and hybridized technologies, *J. Mater. Chem. A.* 7 (2019) 292.
- [13] **M.N. Chernysheva, A.Yu. Rychagov, D.Yu. Kornilov, S.V. Tkachev, S.P. Gubin**, Investigation of sulfuric acid intercalation into thermally expanded graphite in order to optimize the synthesis of electrochemical graphene oxide, *Journal of Electroanalytical Chemistry.* 858 (2020) 113774.
- [14] **V.V. Sleptsov, V.G. Goffman, A.O. Diteleva, T.V. Revenok, Ye.O. Diteleva**, Fizicheskaya model elektrodного materiala dlya gibridnykh kondensatorov // Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov. 2023. T. 59. № 2. S. 1–6.

[15] V.G. Goffman, V.V. Sleptsov, A.V. Gorokhovskiy, N.V. Gorshkov, N.N. Kovyneva, A.V. Sevryugin, M.A. Vikulova, A.M. Baynyashev, A.D. Makarova, Ch. Zo Lvin, *Nakopiteli energii s busofitovymi elektrodami, modifitsirovannymi titanom* // *Elektrokhimicheskaya energetika*. 2020. T. 20, № 1, S. 20–32.

[16] A.S. Varezchnikov, F.S. Fedorov, I.N. Burmistrov, I.A. Plugin, M. Sommer, A.V. Lashkov, A.V. Gorokhovskiy, A.G. Nasibulin, D.V. Kuznetsov, M.V. Gorshenkov, V.V. Sysoev, *The room-temperature chemiresistive properties of potassium titanate whiskers versus organic vapors*, *Nanomaterials*. 7 (12) (2017) 455–463.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Anna O. DITELEVA – *Moscow Aviation Institute (National Research University)*.

E-mail: anna.diteleva@mail.ru

Vladimir V. SLEPTSOV – *Moscow Aviation Institute (National Research University)*.

E-mail: 08fraktal@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1171-336X>

Dmitriy Yu. KUKUSHKIN – *Moscow Aviation Institute (National Research University)*.

E-mail: skyline34@nxt.ru

Поступила: 19.02.2024; Одобрена: 15.03.2024; Принята: 15.03.2024.

Submitted: 19.02.2024; Approved: 15.03.2024; Accepted: 15.03.2024.

Научная статья

УДК 537+519.6

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30107>



А.А. Сысоев¹, Д.И. Иудин¹, В.А. Раков²,
А.А. Емельянов¹, В.Ю. Климашов¹, Н.В. Коробкин³ ✉

¹ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН),
г. Нижний Новгород, Россия;

² Флоридский университет, Гейнсвилл, США;

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

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ С УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ. Ч. 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье представлена вторая часть исследования, посвященного моделированию сильноточных молниевых разрядов. В первой части [часть 1] был описан модельный подход, учитывающий термодинамику разрядных каналов, что позволяет связать проводимость и радиус токового канала лидерных сегментов с их температурой. Данная работа посвящена описанию и анализу результатов моделирования, охватывающих все стадии развития сильноточной молнии. Показано, что модель способна воспроизводить характерные для сильноточных молниевых разрядов токи с амплитудами до десятков тысяч ампер. Результаты моделирования позволяют сформулировать новый сценарий развития компактных внутриоблачных разрядов и начальных импульсов пробоя, основанный на коллективной динамике системы, состоящей из множества взаимосвязанных параллельно развивающихся разрядных каналов. В частности, продемонстрировано, что характерные для них импульсы тока могут формироваться в результате эволюции сети низкотемпературных (стримерных) плазменных каналов, внутри которой формируется горячий хорошо проводящий лидерный каркас, стягивающий на себя токи системы. При этом на всех этапах развития разряда относительная доля лидерных секций не превышает нескольких процентов от полного числа каналов токовой системы.

Ключевые слова: компактный внутриоблачный разряд, начальные импульсы пробоя, стримеры, лидеры, иерархические сети плазменных каналов, термодинамика разрядных каналов, инициация молнии, ступени отрицательного лидера, численное моделирование.

Благодарности: Вклад Сысоева А.А., Иудина Д.И., Емельянова А.А. и Климашова В.Ю. в работу над данной статьей поддержан грантом Российского научного фонда, проект № 23-21-00057.

Для цитирования:

Сысоев А.А., Иудин Д.И., Раков В.А. и др. Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов с учетом термодинамики плазменных каналов. Ч. 2. Анализ результатов моделирования // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 117–135. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30107>



A.A. Sysoev¹, D.I. Iudin¹, V.A. Rakov²,
A.A. Emelyanov¹, V.Yu. Klimashov¹, N.V. Korovkin³ ✉

¹ Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russia;

² University of Florida, Gainesville, USA;

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

✉ nikolay.korovkin@gmail.com

NUMERICAL SIMULATION OF HIGH-CURRENT ATMOSPHERIC DISCHARGES WITH CONSIDERATION OF PLASMA CHANNELS THERMODYNAMICS. PART 2. ANALYSIS OF SIMULATION RESULTS

Abstract. The article presents the second part of the study devoted to the modeling of high-current lightning discharges. The first part [part 1] describes a model approach taking into account discharge channels thermodynamics that allows us to relate conductivity and the current-carrying radius of leader segments to their temperature. The study presents and analyses simulation results covering all stages of the high-current lightning development. It is shown that the model is capable of reproducing currents characteristic of high-current lightning discharges with amplitudes up to tens of thousands of amperes. Simulation results let us formulate a new scenario of development of compact intracloud discharges and initial breakdown pulses based on collective dynamics of a system consisting of a large number of interconnected discharge channels developing in a parallel. In particular, it is demonstrated that current pulses characteristic of compact intracloud discharges and initial breakdown pulses can form as a result of evolution of a network of low-temperature (streamer) plasma channels. Inside this network, a hot well-conducting leader frame forms drawing the system currents onto itself. At the same time, at all the stages of discharge development the relative fraction of leader sections does not exceed a few percent of the total number of channels in the current system.

Keywords: compact intracloud discharge, initial breakdown pulses, streamers, leaders, hierarchical networks of plasma channels, discharge channels thermodynamics, lightning initiation, negative leader steps, numerical simulation.

Acknowledgements: Contribution of Sysoev A.A., Iudin D.I., Emelyanov A.A. and Klimashov V.Yu. to the work on this article was supported by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 23-21-00057.

Citation:

A.A. Sysoev, D.I. Iudin, V.A. Rakov et al., Numerical simulation of high-current atmospheric discharges with consideration of plasma channels thermodynamics. Part 2. Analysis of simulation results, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 117–135, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30107>

Результаты моделирования. Основные стадии развития сильноточного разряда показаны на рис. 1 и 2. На начальном этапе система представляет собой совокупность разрозненных положительных стримеров, которые, в силу асимметрии полярностей, всегда появляются раньше отрицательных. По мере развития системы положительных стримеров, растущих из общего «корня», в точке их старта накапливается достаточно большой отрицательный заряд, что создает условия для появления отрицательных стримеров. Отдельные стримерные системы, растущие преимущественно вдоль направления вектора напряженности внутриоблачного электрического поля E_a , срастаются в единую плазменную сеть. В рамках этой сети в местах наибольшей концентрации

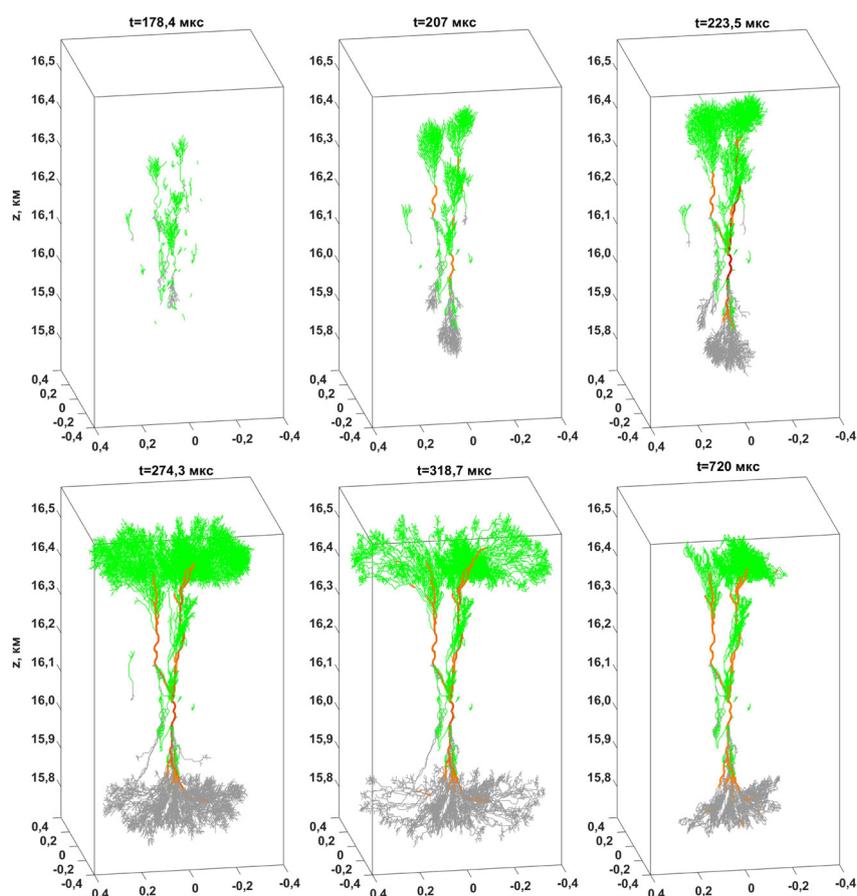


Рис. 1. Основные этапы эволюции сильноточного разряда. Положительные и отрицательные стримеры обозначены зеленым и серым цветами соответственно. Лидерные секции выделены красным. Над каждой панелью указано время, прошедшее от начала моделирования. Числа на всех трех осях обозначены в километрах

Fig. 1. Main stages of a high-current discharge evolution. Positive and negative streamers are shown in green and gray, respectively. Leader sections are denoted by red. The time from the start of the simulation is indicated above each panel. The numbers on all three axes are in kilometers

токов (как правило точки старта стримерных систем) формируются первые зачатки лидерных каналов. Разрозненные лидерные сегменты постепенно удлиняются и прогреваются, увеличивая напряженность электрического поля на своих головках. Запускается механизм электростатического притяжения между положительными головками одних лидеров и отрицательными головками других. Происходит агрегация множества коротких лидеров с образованием нескольких более крупных, которая пока еще не сопровождается заметными всплесками тока. Это, вероятно, объясняется относительно небольшой длиной и проводимостью «незрелых» лидерных сегментов. Кроме того, они вложены в стримерную сеть, состоящую из большого числа параллельных каналов. Несмотря на малую проводимость отдельных стримеров, их совокупный ток способствует релаксации напряженности электрического поля в занятом ими объеме, что позволяет эффективно «гасить» локальные всплески поля. Интенсивный импульс тока возникает несколько позднее, когда пара длинных хорошо поляризованных лидерных сегментов срастается в единый канал, пронизывающий плазменную сеть вдоль выделенного направления роста (см. панель рис. 2, соответствующую моменту времени 223,5 мкс). Данная стадия инициации молнии, которую на языке теории перколяции можно назвать этапом кластер-кластерной агрегации, обсуждается в [2] и численно исследована в работе [3].

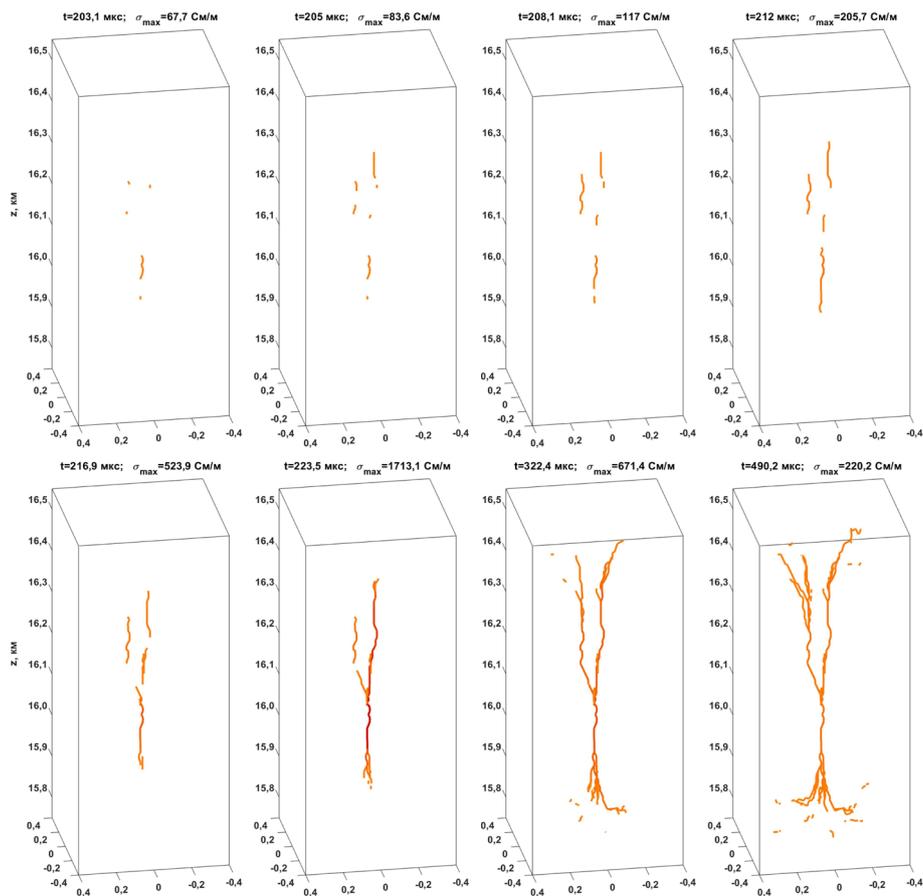


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но с учетом только горячих лидерных каналов, формирующих проводящий каркас системы. Более темные цвета соответствуют большим проводимостям. Кроме времени над каждой панелью указано текущее значение максимальной проводимости σ_{\max}

Fig. 2. Same as Fig. 1, but with only hot leader channels forming the well conducting frame of the system. Darker colors correspond to higher conductivities. In addition to time, the value of maximum conductivity σ_{\max} is shown above each panel

По новообразованному каналу протекает кратковременный мощный импульс тока выравнивания потенциалов (поляризации) с амплитудой порядка 40 кА (см. рис. 3). Быстрое разделение большого количества заряда приводит к резкому усилению напряженности электрического поля и, как следствие, к увеличению скорости роста стримеров на полюсах разряда. Возникают мощные стримерные короны, обладающие практически плоским фронтом и растущие со скоростями порядка $4 \cdot 10^6$ м/с (см. рис. 4). На этом этапе разряд принимает форму классического биполярного лидера. После выхода на границы зоны сильного поля рост разряда практически останавливается в вертикальном направлении, но какое-то время продолжается в латеральной плоскости. Такое поведение типично для каналов молнии, распространяющихся на высотах, соответствующих экстремумам внутриоблачного потенциала (центры зарядовых слоев) [4]. Температура (проводимость) лидерного каркаса начинает медленно спадать, как и суммарный ток разряда. На финальном этапе моделирования система состоит из постепенно остывающих практически обесточенных останков.

Некоторые динамические аспекты развития системы представлены на рис. 4–6.

Примеры эволюции параметров двух модельных каналов на различных этапах развития системы представлены на рис. 7.

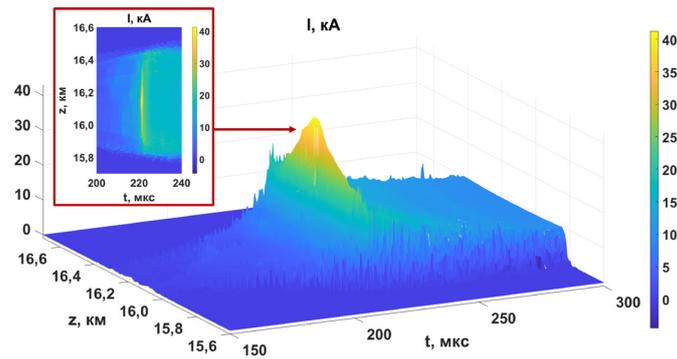


Рис. 3. Высотно-временной профиль тока сильноточного разряда.
 Вставка в левом верхнем углу рисунка акцентирует момент формирования импульса тока
 Fig. 3. Altitude-time profile of current of the high-current discharge.
 The inset in the upper left corner of the figure accentuates the moment of the current pulse formation

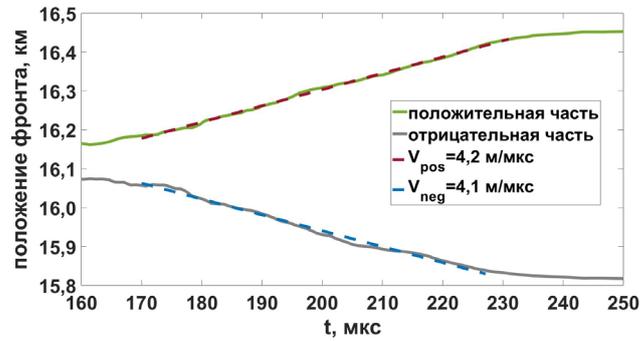


Рис. 4. Динамика распространения положительного и отрицательного фронтов разряда (усредненные положения) по вертикали. Аппроксимирующие пунктирные прямые используются для оценки соответствующих скоростей роста на «активном» этапе развития системы
 Fig. 4. Propagation dynamics of positive and negative discharge fronts (averaged positions) along the vertical direction. Approximating dotted lines are used to estimate the corresponding growth speeds at the “active” stage of the system development

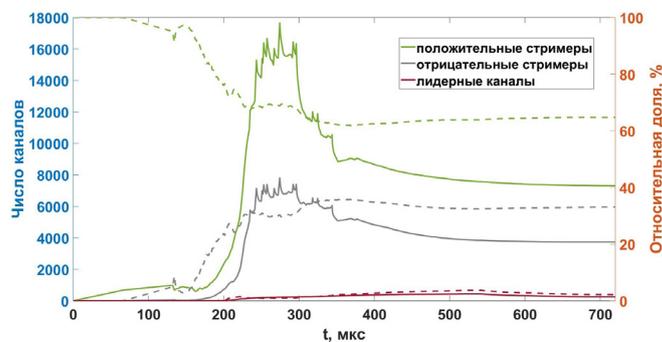


Рис. 5. Временная динамика изменения состава системы. Сплошными и пунктирными линиями обозначены количества каналов и их относительные доли соответственно
 Fig. 5. Temporal dynamics of changes in the system composition. Solid and dotted lines indicate numbers of channels and their relative shares, respectively

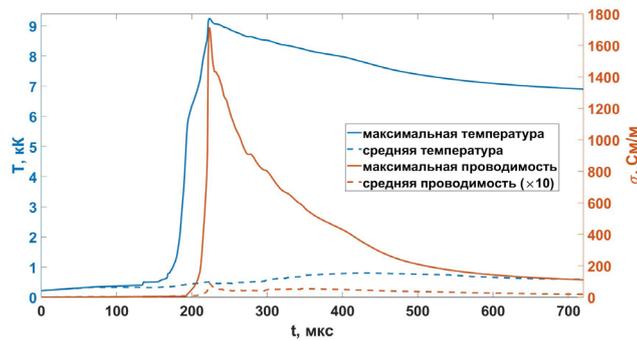


Рис. 6. Динамика изменения температуры и проводимости системы
 Fig. 6. Dynamics of changes in temperature and conductivity of the system

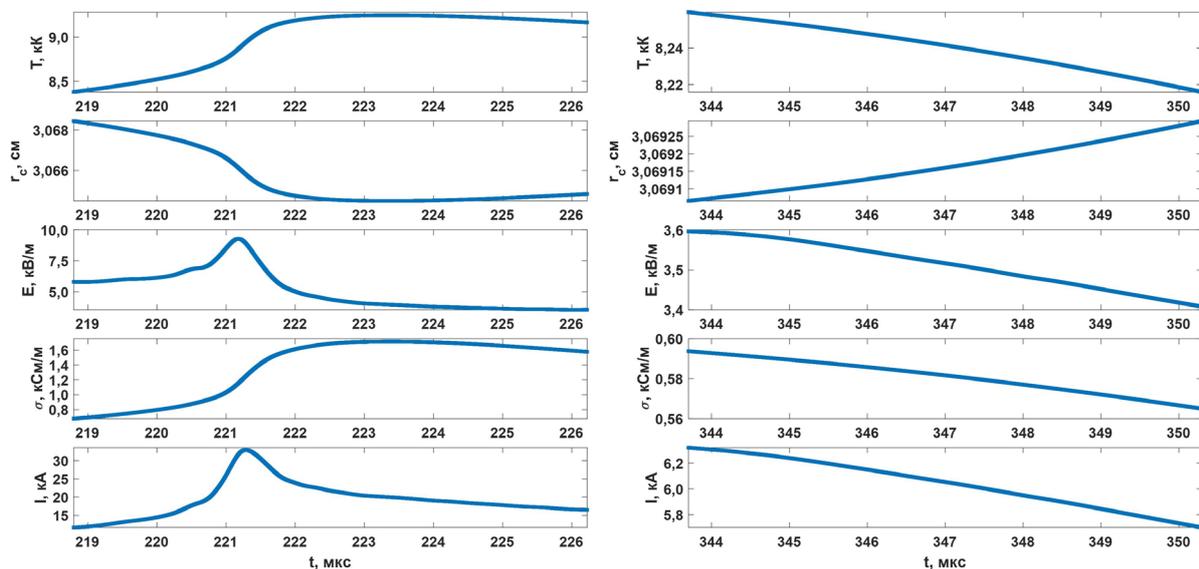


Рис. 7. Примеры эволюции температуры, радиуса токового канала, напряженности продольного электрического поля, проводимости и тока в двух отдельно взятых каналах. Левая и правая панели соответствуют этапам максимального тока и затухания системы соответственно
 Fig. 7. Examples of the evolution of temperature, current-carrying radius, longitudinal electric field strength, conductivity and current in two individual channels. The left and right panels correspond to the stages of maximum current and system decay, respectively

С точки зрения электрического поля излучения в дальней зоне наибольший интерес представляет радиационная компонента, пропорциональная производной тока по времени. Очевидно, что за биполярный импульс поля излучения отвечает мощный импульс тока выравнивания потенциалов, возникающий в момент слияния двух наиболее крупных лидерных фрагментов в единый канал. До момента его формирования система, состоящая из стримерных каналов и вложенных в плазменную сеть лидерных сегментов длиной от единиц до нескольких десятков метров, не способна породить внутри себя достаточно больших токов. После образования лидерного канала область относительно сильного внутриоблачного поля фактически исчерпывает свою ресурс поддержания дальнейшего роста разряда. Действительно, длина лидерного канала совпадает с протяженностью плазменной сети, которая, в свою очередь, заполняет собой зону

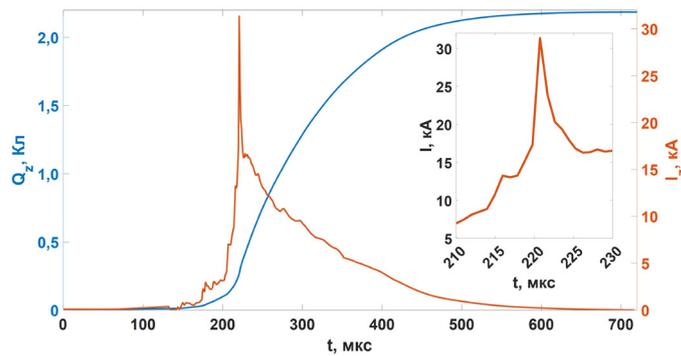


Рис. 8. Динамика изменения разделенного по вертикали заряда Q_z и его первой производной $I_z = dQ_z/dt$
 Fig. 8. Dynamics of vertically divided charge Q_z and its first derivative $I_z = dQ_z/dt$

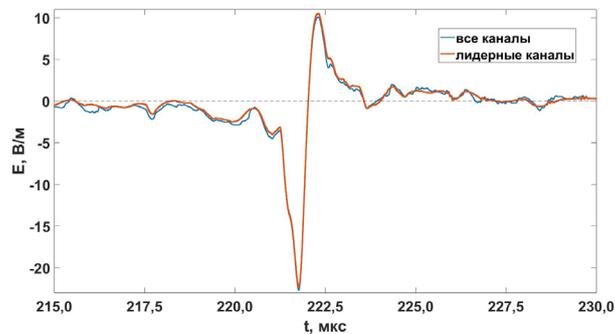


Рис. 9. Биполярный импульс электрического поля излучения моделируемой системы токов в дальней зоне (на расстоянии 100 км от источника)
 Fig. 9. Bipolar electric field radiation pulse produced by the simulated system of currents in the far zone (at a distance of 100 km from the source)

сильного поля. Поэтому на момент образования лидерный канал уже перекрывает данную зону по всей длине. Дальнейшее разрастание стримерных корон, способствующее растаскиванию заряда, разделенного импульсом тока поляризации, происходит как бы по инерции. Полный ток системы монотонно уменьшается, но модуль производной dI/dt слишком мал, чтобы обеспечить поле излучения, сопоставимое по амплитуде с предшествующим биполярным импульсом. Временная зависимость разделенного системой заряда Q_z и его первой производной $I_z = dQ_z/dt$ (полный вертикальный ток системы) представлена на рис. 8.

Биполярный импульс излучения, соответствующий всплеску тока системы, показан на рис. 9. Представленная осциллограмма соответствует стандартному расстоянию 100 км от источника, используемому для нормировки полей излучения КВР и НИП (см., например, [5–16]). Она рассчитана по описанному в [17] алгоритму, который принимает во внимание положение и пространственную ориентацию разрядных каналов и позволяет построить вертикальную компоненту напряженности электрического поля излучения в точке нахождения антенны как сумму полей излучения от каждой модельной связи. При этом высокое временное разрешение профилей тока каналов, получаемых с точностью до единиц наносекунд, гарантирует высокую детализацию результирующей осциллограммы $E(t)$. Сравнение вклада от горячих лидерных каналов с полным сигналом позволяет заключить, что именно лидерный каркас отвечает за характерное излучение системы.

Влияние высоты на особенности развития КВР и НИП

Описанный в данной работе сильноточный разряд характеризуется единственным всплеском тока и переносит положительный заряд вверх, что позволяет идентифицировать его как верхний КВР. Поскольку, как обосновано в [1], параметры импульсов излучения КВР и НИП во многом схожи, есть основания полагать, что они имеют близкие механизмы эволюции и что используемый в данной работе модельный подход может быть также применен к моделированию серии импульсов тока НИП.

Принципиальное отличие между двумя типами сильноточных разрядов заключается в том, что КВР является одиночным событием, а НИП подразумевает наличие серии (около 10) импульсов тока (поля излучения). Возможной причиной этого может быть разность высот формирования данных типов разрядов. Действительно, для нижних и верхних КВР типичны высоты 7–15 [18], 6–16 [19], 7–15 (медианное значение равно 13) [20] км и >14 [18], 16–19 [19], 15–20 (медианное значение равно 18) [20] км соответственно, в то время как НИП возникают на высотах порядка 4–8 км [8, 9, 21] (3–4 и 5,4–11,5 км согласно [22] и [23] соответственно). В работе [13], отдельно рассматривающей высоты формирования НИП, предшествующих разрядам типа облако-земля и внутриоблачным разрядам, были получены средние значения 6 и 9,1 км соответственно. Чтобы объяснить, как высота над землей (концентрация молекул воздуха) может влиять на механизм развития разряда, обратимся к высотным изменениям параметров ступеней отрицательного лидера.

На малых высотах (вблизи земли) основным инструментом изучения ступеней отрицательного лидера являются высокоскоростные оптические камеры (см., например, [24–26] и ссылки там). Типичные значения длин ступеней, межступенчатых интервалов и усредненных скоростей роста составляют 1–10 м, 10–20 мкс и 10^5 – 10^6 м/с соответственно. Например, авторы [26] оценили соответствующие значения как 1–13 м, 13,9–23,9 мкс и $4,1$ – $14,6 \cdot 10^5$ м/с соответственно (см. также их табл. 1, содержащую данные аналогичных измерений других работ). На больших высотах канал молнии скрыт внутри облака, и для наблюдения динамики его развития прибегают к радиоинтерферометрическим методам (обычно используются системы LMA, от англ. “Lightning Mapping Array”, см. [27] и ссылки там). При этом начиная с высот 5–7 км параметры ступеней оказываются существенно отличными от приземных. Так, измерения [28] свидетельствуют о длинах ступеней порядка нескольких сотен метров, межступенчатых интервалах длительностью несколько миллисекунд и средней скорости распространения, равной $5 \cdot 10^4$ м/с на высотах выше 7 км. Более того, авторы ассоциируют резкое изменение параметров ступеней на высоте 7 км над землей с фазовым переходом (см. также работу [29]). Результаты [30], основанные на данных оптической съемки, свидетельствуют о длинах ступеней от 200 м и более, межступенчатых интервалах длительностью 4,3 мс и скорости роста $4,7 \cdot 10^4$ м/с на высоте порядка 10 км. Сравнение параметров ступеней на различных высотах приводит к заключению о том, что условия формирования пространственных стемов, потенциальных зачатков пространственных лидеров, ухудшаются с ростом высоты. Действительно, авторы [30] отмечают, что “leader steps at high altitude are completed at a lower rate than at low altitude (ступени лидера на больших высотах формируются с меньшей частотой, чем на малых)”.

Большую роль в формировании ступеней может играть концентрация пространственных стемов (среднее расстояние между ними). Так, авторы исследования [31], в котором изучалось распространение отрицательного лидера в промежутке стержень-стержень длиной 16,7 м, отмечают “a space leader only starts to elongate from the space stem if a new space stem, connected to the old one, is created further in the gap (пространственный лидер начинает расти с пространственного стема только если новый пространственный стем, подсоединенный к исходному, формируется в промежутке)” и “a space stem requires another pilot, namely another space stem downstream in the gap, to generate a space leader (пространственный стем нуждается в дополнительном «пилоте»,

то есть другом пространственном стеме ниже в промежутке, чтобы создать пространственный лидер)».

В работе [32] была промоделирована трехмерная картина распределения напряженности электрического поля внутри и на периферии стримерных зон положительного и отрицательного лидеров молнии. Было показано, что с ростом высоты над землей падает не только отношение максимальной напряженности электрического поля перед головкой лидера к разрядной напряженности воздуха, но и число зон, в которых напряженность электрического поля превышает порог пробоя воздуха и которые потенциально могут быть местами появления пространственных стемов. Таким образом, результаты исследования [32] предсказывают уменьшение числа пространственных стемов, потенциальных зачатков пространственных лидеров, с падением плотности воздуха, что, в соответствии с результатами описанных выше экспериментальных наблюдений, должно препятствовать формированию ступеней лидера на больших высотах.

Вполне возможно, что сценарий инициации молнии [2, 33], подразумевающий «вызревание» лидерного канала внутри плазменной сети, может быть обобщен на случай КВР и НИП. Для НИП, формирующихся на меньших высотах, последовательное слияние большого числа пространственных стемов/лидеров обеспечивает несколько ступеней начального лидера, наблюдаемых в дальней зоне как серия всплесков электрического поля. В случае более высотных КВР образуется гораздо меньше пространственных стемов/лидеров, в результате чего формируется одна единственная «ступень», пронизывающая плазменную сеть по всей длине (см. рис. 1, 2). С другой стороны, большие высоты также означают больший объем плазменной сети, поскольку, согласно закону подобия $d \cdot N = \text{const}$, линейные размеры разряда d масштабируются с высотой как обратная концентрация молекул N^{-1} . Соответственно, при прочих равных условиях объем сети и количество вовлекаемого в пробой внутриоблачного заряда меняются как N^{-d_f} , где d_f – фрактальная размерность плазменной сети. Фактор N^{-d_f} должен увеличиваться с ростом высоты, даже несмотря на возможное падение фрактальной размерности d_f . Последнее обусловлено нелинейным увеличением среднего расстояния между точками ветвления стримеров с уменьшением давления воздуха [34]. Увеличение вовлекаемого в пробой заряда с ростом высоты может объяснить, почему, даже несмотря на падение напряженностей характерных электрических полей, отвечающих за эволюцию разряда (в соответствии с другим законом подобия $E/N = \text{const}$), пиковые токи импульсов КВР в среднем больше, чем в случае НИП (сравни $\sim 1\text{--}40$ кА для НИП [11, 12, 35] и $5\text{--}290$ кА для КВР [7, 10, 19, 36]). При этом статистически максимальные токи верхних КВР заметно больше, чем токи нижних. Согласно данным [19], соответствующие геометрические средние составляют 33 кА для нижних и 113 кА для верхних КВР.

Отметим, что предложенная в [1] модель способна отразить высотные изменения условий формирования плазменных каналов. Во-первых, все термодинамические параметры, входящие в уравнение теплопроводности, являются функциями давления воздуха. Во-вторых, что более важно, термический радиус r_T (расстояние от оси канала, на котором температура падает e раз по сравнению с максимальным осевым значением) и радиус токового канала r_c масштабируются с высотой как N^{-1} , а характерная напряженность продольного электрического поля в канале – как N . Согласно тестовым расчетам, уменьшение поперечного сечения проводящей части канала $Sc = \pi r_c^2 \sim N^{-2}$ на высотах развития НИП уменьшает его пропускную способность, что способствует поддержанию высокого уровня напряженности продольного электрического поля канала и быстрому росту его проводимости. Соответственно, относительная доля хорошо проводящих лидерных секций, как и частота их слияний, растет с падением высоты. Результаты дополнительных расчетов, полученных путем численного решения уравнения теплопроводности в r - t пространстве и подтверждающих ухудшение условий формирования и поддержания лидерного канала с ростом высоты, представлены на рис. 10. Дополнительные аргументы в пользу ухудшения условий формирования термализованного лидерного канала с уменьшением давления воздуха (ростом высоты) приведены в работе [37].

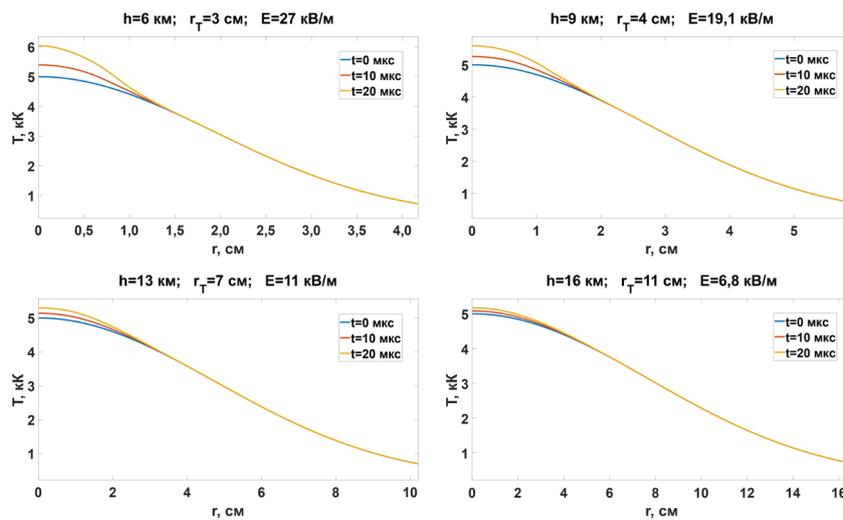


Рис. 10. Результаты численного решения уравнения теплопроводности на различных высотах, подтверждающие ухудшение условий формирования и поддержания горячего лидерного канала с ростом высоты над землей. На всех высотах напряженность электрического поля в канале составляет 10% от порога поддержания роста положительных стримеров, равного 500 кВ/(м·атм)

Fig. 10. Results of numerical solution of the heat conduction equation at different heights confirming deterioration of conditions for the formation and maintenance of a hot leader channel with increasing height above the ground. At all altitudes, electric field strength in the channel is 10% of the threshold for maintaining the growth of positive streamers equal to 500 kV/(m·atm)

Моделирование процесса формирования НИП, переходящего в ступенчатый отрицательный лидер молнии, является целью будущих исследований.

Обсуждение

Воспроизведенный в рамках моделирования процесс формирования сильноточного разряда соответствует сценарию [2, 33]. Все начинается с заполнения части грозового облака многочисленными одновременно развивающимися стримерными системами, которые затем сливаются в единую плазменную сеть. Внутри этой сети в местах наибольшей концентрации токов возникают каналы с повышенным уровнем энерговыделения, что приводит к росту их температуры (проводимости). Эти участки сети, выделяющиеся на общем стримерном фоне, можно назвать модельными аналогами необычных плазменных образований, недавно обнаруженных внутри искусственного облака заряженного водного аэрозоля [38, 39]. Постепенно они превращаются в поляризованные во внешнем поле лидерные сегменты. По мере удлинения лидерных каналов напряженность электрического поля на их концах усиливается, и их головки начинают ускоренно расти навстречу друг другу. В момент, когда в результате серии таких слияний образуется крупномасштабный канал, пронизывающий всю систему вдоль направления вектора напряженности внешнего электрического поля, по нему проходит мощный импульс тока поляризации. Близкий сценарий развития КВР описан в [40], где всплеск тока возникает в результате слияния двух изначально изолированных друг от друга стримерных конструкций, возникающих на вертикальном расстоянии 200 м друг от друга. При этом предполагалось, что исходное распределение внутриоблачного потенциала создается пучковой неустойчивостью, развивающейся в плазмоподобной облачной среде и приводящей к крупномасштабному разделению пространственного заряда [41–43]. В отличие от данной работы, модель [40] не воспроизводит процесс формирования объемной плазменной сети и не учитывает термодинамику разрядных каналов. Динамика развития модельной системы также напоминает процесс формирования ступени отрицательного лидера,

который включает в себя акт слияния пространственного лидера с основным отрицательным и сопровождается волной тока выравнивания потенциалов (см. [44] и ссылки там). Основная разница заключается в пространственных масштабах и, как следствие, амплитудах импульса тока поляризации.

Рассуждая о воспроизведенном в рамках модели сценарии формирования сильноточного разряда, нельзя не отметить фундаментального сходства между макромасштабным пробоем облачной среды и хрупким разрушением материала [45]. Подобно тому, как для инициации молнии не требуется наличие однородного поля, превышающего разрядную напряженность воздуха ($\approx 3 \text{ МВ}/(\text{м}\cdot\text{атм})$ [46]), прочность большинства материалов на несколько порядков меньше значения теоретической прочности на разрыв, полученного в предположении об одновременном разрыве межатомных связей по всей плоскости разрушения. По аналогии с разрушением материала, включающим в себя стадии зарождения микротрещин с размерами порядка 100 нм и их последующее распространение, формирование лидера молнии начинается с появления отдельных проводящих зародышей (пространственных стемов/лидеров), после чего происходит их удлинение вдоль направления вектора \mathbf{E}_a с последующим слиянием. По мере удлинения хрупкой трещины для ее развития требуется все меньшее и меньшее механическое напряжение, что делает процесс ее роста самоускоряющимся. Точно так же при удлинении лидерного канала (увеличении аспектного отношения проводника) растет напряженность электрического поля на его периферии, так что для поддержания его дальнейшего распространения требуется все меньшая и меньшая напряженность внешнего поля. При этом большая напряженность электрического поля на фронте роста разряда соответствует большей скорости роста стримеров и, как следствие, лидерного канала. В случае хрупкого разрушения скорость распространения трещины может достигать 40–50% от скорости звука в материале образца. Аналогично лидерный канал, пронизывающий плазменную сеть вдоль направления вектора \mathbf{E}_a , возникает практически мгновенно, со скоростью от нескольких до десятков процентов от скорости света.

Очень может быть, что чрезвычайно высокие скорости быстрого положительного/отрицательного пробоев, лежащие в диапазоне 10^7 – 10^8 м/с (3,3–33% от скорости света в воздухе) и отнесенные авторами [47, 48] к стримерам, на самом деле являются скоростью распространения волны ионизации вдоль новообразованного лидерного канала. В этом смысле воспроизведенный в рамках моделирования процесс формирования сильноточного разряда можно назвать фазовым переходом, поскольку он подразумевает практически мгновенную трансформацию плазменной сети от условно непроводящего состояния к проводящему. Параметром данного перехода является концентрация проводящих элементов сети. При этом не только до, но даже после фазового перехода относительная доля горячих хорошо проводящих лидерных каналов остается пренебрежимо малой. На это указывает относительная небольшая фрактальная размерность необычных плазменных образований, оцененная как 1,5–1,8 для двумерных изображений (см. рис. 1 работы [1]), вложенных в объемную сеть плазменных каналов, фрактальная размерность которой близка к тройке. Можно предположить, что и фрактальная размерность подмножества лидерных каналов, образующих проводящий каркас системы, принадлежит диапазону от 1 до 2. Соответствующие оценки для модельного лидерного каркаса дают максимальное значение его фрактальной размерности, равное 1,32.

Общее заключение

В первой части исследования [1] был представлен новый численный метод, позволяющий моделировать импульсные токи с амплитудами до десятков тысяч ампер, присущие таким сильноточным разрядам, как КВР и НИП. Основной особенностью модели [1], благодаря которой это стало возможным, является учёт термодинамики разрядных каналов, что позволяет корректно описать проводимость и радиус токового канала, а, следовательно, и ток лидерных элементов

системы. В данной работе представлены результаты применения модели [1] к описанию эволюции сильноточного разряда. Было установлено, что лидерный каркас системы может формироваться за счёт срастания наиболее горячих элементов изначально холодной стримерной сети, которые можно назвать естественными аналогами необычных плазменных образований. Практически мгновенное возникновение лидерного канала, пронизывающего систему вдоль направления вектора напряженности внутриоблачного поля, сопровождается кратковременным импульсом тока поляризации (выравнивания потенциалов) амплитудой в десятки тысяч ампер. В дальнейшем система развивается как типичный биполярный лидер молнии, головки которого оканчиваются мощными стримерными зонами. Резкое усиление напряженности электрического поля на концах проводящей структуры обеспечивает высокие скорости роста и интенсивное ветвление стримерных корон на периферии разряда. Эта особенность вкупе с относительно малой долей лидерных секций в общей структуре системы отчасти согласуется с концепцией быстрого стримерного пробоя. Однако не стримеры, а именно лидерный каркас обеспечивает характерный всплеск тока сильноточного разряда. Результаты данной работы ограничены моделированием верхнего КВР. В будущих исследованиях авторы планируют применить описанный подход к воспроизведению серии импульсов тока НИП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Сысоев А.А., Иудин Д.И., Раков В.А., Емельянов А.А., Климашов В.Ю., Коровкин Н.В. Численное моделирование сильноточных атмосферных разрядов с учетом термодинамики плазменных каналов. Ч. 1. Описание модели // Глобальная энергия. 2023. Т. 29. № 4. С. xx, DOI: xx
- [2] Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M. From decimeter-scale elevated ionic conductivity regions in the cloud to lightning initiation, *Scientific Reports*, 11 (1) (2021) 18016, DOI: 10.1038/s41598-021-97321-4
- [3] Syssoev A.A., Iudin D.I., Iudin F.D., Klimashov V.Yu., Emelyanov A.A. Relay charge transport in thunderclouds and its role in lightning initiation, *Scientific Reports*, 12 (1) (2022) 7090, DOI: 10.1038/s41598-022-10722-x
- [4] Coleman L.M., Stolzenburg M., Marshall T.C., Stanley M. Horizontal lightning propagation, preliminary breakdown, and electric potential in New Mexico thunderstorms, *Journal of Geophysical Research*, 113 (2008) D09208, DOI: 10.1029/2007JD009459
- [5] Ahmad N.A., Fernando M., Baharudin Z.A., Cooray V., Ahmad H., Abdul Malek Z. Characteristics of narrow bipolar pulses observed in Malaysia, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72 (5–6) (2010) 534–540, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.02.006
- [6] Nag A., Rakov V.A., Tsalikis D., Cramer J.A. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010) D14115, DOI: 10.1029/2009JD012957
- [7] Nag A., Rakov V.A., Cramer J.A. Remote measurements of currents in cloud lightning discharges, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53 (2) (2011) 407–413, DOI: 10.1109/TEMC.2010.2073470
- [8] Stolzenburg M., Marshall T.C., Karunarathne S., Karunarathna N., Vickers L.E., Warner T.A., Orville R.E., Betz H.-D. Luminosity of initial breakdown in lightning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 2918–2937, DOI: 10.1002/jgrd.50276
- [9] Stolzenburg M., Marshall T.C., Karunarathne S., Karunarathna N., Orville R.E. Leader observations during the initial breakdown stage of a lightning flash, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (2014) 12,198–12,221, DOI: 10.1002/2014JD021994
- [10] Karunarathne S., Marshall T.C., Stolzenburg M., Karunarathna N. Observations of positive narrow bipolar pulses, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2015) 7128–7143, DOI: 10.1002/2015JD023150

- [11] **Karunarathne N., Marshall T.C., Karunarathne S., Stolzenburg M.** Studying sequences of initial breakdown pulses in cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD032104, DOI: 10.1029/2019JD032104
- [12] **Kolmašová I., Santolík O., Farges T., Cummer S.A., Lán R., Uhlíř L.** Subionospheric propagation and peak currents of preliminary breakdown pulses before negative cloud-to-ground lightning discharges, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1382–1391, DOI: 10.1002/2015GL067364
- [13] **Smith E.M., Marshall T.C., Karunarathne S., Siedlecki R., Stolzenburg M.** Initial breakdown pulse parameters in intracloud and cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (2018) 2129–2140, DOI: 10.1002/2017JD027729
- [14] **Bandara S., Marshall T., Karunarathne S., Stolzenburg M.** Electric field change and VHF waveforms of positive narrow bipolar events in Mississippi thunderstorms, *Atmospheric Research*, 243 (2020) 105000, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105000
- [15] **Bandara S., Marshall T., Stolzenburg M.** Further studies of positive narrow bipolar events detected at close range, *Atmospheric Research*, 286 (2023) 106668, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106668
- [16] **Rakov V.A., Tran M.D., Zhu Y., Ding Z., Leal A.F.R., Kereszy I., Chen S.** New insights into the lightning discharge processes, *Plasma Sources Science and Technology*, 31 (2022) 104005, DOI: 10.1088/1361-6595/ac9330
- [17] **Sysoev A.A., Iudin D.I., Karashtin A.N., Shlyugaev Yu.V.** Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 221 (2021) 105686, DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105686
- [18] **Zhang H., Lu G., Qie X., Jiang R., Fan Y., Tian Y., Sun Z., Liu M., Wang Z., Liu D., Feng G.** Locating narrow bipolar events with single-station measurement of low-frequency magnetic fields, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 143–144 (2016) 88–101, DOI: 10.1016/j.jastp.2016.03.009
- [19] **Leal A.F.R., Rakov V.A.** A study of the context in which compact intracloud discharges occur, *Scientific Reports*, 9 (2019) 12218, DOI: 10.1038/s41598-019-48680-6
- [20] **Smith D.A., Heavner M.J., Jacobson A.R., Shao X.M., Massey R.S., Sheldon R.J., Wiens K.C.** A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records, *Radio Science*, 39 (2004) RS1010, DOI: 10.1029/2002RS002790
- [21] **Kolmasova I., Marshall T., Bandara S., Karunarathne S., Stolzenburg M., Karunarathne N., Siedlecki R.** Initial breakdown pulses accompanied by VHF pulses during negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 46 (2019) 5592–5600, DOI: 10.1029/2019GL082488
- [22] **Kolmašová I., Santolík O., Farges T., Rison W., Lán R., Uhlíř L.** Properties of the unusually short pulse sequences occurring prior to the first strokes of negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 5316–5324, DOI: 10.1002/2014GL060913
- [23] **Lyu F., Cummer S.A., Lu G., Zhou X., Weinert J.** Imaging lightning intracloud initial stepped leaders by low-frequency interferometric lightning mapping array, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1–8, DOI: 10.1002/2016GL069267
- [24] **Hill J.D., Uman M.A., Jordan D.M.** High-speed video observations of a lightning stepped leader, *Journal of Geophysical Research*, 116 (2011) D16117, DOI: 10.1029/2011jd015818
- [25] **Petersen D.A., Beasley W.H.** High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 12,110–12,119, DOI: 10.1002/2013jd019910
- [26] **Qi Q., Lu W., Ma Y., Chen L., Zhang Y., Rakov V.A.** High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance, *Atmospheric Research*, 178–179 (2016) 260–267, DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.03.027
- [27] **Dwyer J.R., Uman M.A.** The physics of lightning, *Physics Reports*, 534(4) (2014) 147–241, DOI: 10.1016/j.physrep.2013.09.004

[28] **Scholten O., Hare B.M., Dwyer J., Liu N., Sterpka C., Buitink S., Corstanje A., Falcke H., Huege T., Hörandel J.R., Krampah G.K., Mitra P., Mulrey K., Nelles A., Pandya H., Rachen J.P., Trinh T.N.G., Veen S. ter, Thoudam S., Winchen T.** Distinguishing features of high altitude negative leaders as observed with LOFAR, *Atmospheric Research*, 260 (2021) 105688, DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105688

[29] **Scholten O., Hare B.M., Dwyer J., Liu N., Sterpka C., Buitink S., Huege T., Nelles A., Veen S. ter.** Time resolved 3D interferometric imaging of a section of a negative leader with LOFAR, *Physical Review D*, 104 (2021) 063022, DOI: 10.1103/PhysRevD.104.063022

[30] **Edens H.E., Eack K.B., Rison W., Hunyady S.J.** Photographic observations of streamers and steps in a cloud-to-air negative leader, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 1336–1342, DOI: 10.1002/2013GL059180

[31] **Ortega P., Domens P., Gibert A., Hutzler B., Riquel G.** Performance of a 16.7 m air rod-plane gap under a negative switching impulse, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27 (1994) 2379–2387, DOI: 10.1088/0022-3727/27/11/019

[32] **Syssoev A.A., Iudin D.I.** Numerical simulation of electric field distribution inside streamer zones of positive and negative lightning leaders, *Atmospheric Research*, 295 (2023) 107021, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107021

[33] **Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M.** Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds, *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2 (46) (2019) 1–10, DOI: 10.1038/s41612-019-0102-8

[34] **Nudnova M.M., Starikovskii A.Y.** Development of streamer flash initiated by HV pulse with nanosecond rise time, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36 (2008) 896–897, DOI: 10.1109/TPS.2008.920289

[35] **Betz H.-D., Marshall T.C., Stolzenburg M., Schmidt K., Oettinger W.P., Defer E., Konarski J., Larroche P., Dombai F.** Detection of in-cloud lightning with VLF/LF and VHF networks for studies of the initial discharge phase, *Geophysical Research Letters*, 35 (2008) L23802, DOI: 10.1029/2008GL035820

[36] **Leal A.F.R., Rakov V.A., Rocha B.R.P.** Compact intracloud discharges: New classification of field waveforms and identification by lightning locating systems, *Electric Power Systems Research*, 173 (2019) 251–262, DOI: 10.1016/j.epsr.2019.04.016

[37] **Cooray V., Cooray G., Rubinstein M., Rachidi F.** Modeling compact intracloud discharge (CID) as a streamer burst, *Atmosphere*, 11 (5) (2020) 549, DOI: 10.3390/atmos11050549

[38] **Kostinskiy A.Yu., Syssoev V.S., Bogatov N.A., Mareev E.A., Andreev M.G., Makalsky L.M., Sukharevsky D.I., Rakov V.A.** Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds, *Geophysical Research Letters*, 42 (2015) 8165–8171, DOI: 10.1002/2015GL065620

[39] **Kostinskiy A.Yu., Bogatov N.A., Syssoev V.S., Mareev E.A., Andreev M.G., Bulatov M.U., Sukharevsky D.I., Rakov V.A.** Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (2022) e2021JD035821, DOI: 10.1029/2021JD035821

[40] **Иудин Д.И., Давыденко С.С.** Фрактальная модель компактного внутриоблачного разряда. I. Особенности строения и эволюции // *Известия ВУЗов. Радиофизика*. 2015. Т. 58. № 7. С. 530551.

[41] **Трахтенгерц В.Ю.** О природе электрических ячеек в грозовом облаке // *Доклады АН СССР*. 1989. Т. 308. № 3. С. 584–586.

[42] **Mareev E.A., Sorokin A.E., Trakhtengerts V.Yu.** Effects of collective charging in a multiframe aerosol plasma, *Plasma Physics Reports*, 25(3) (1999) 261–272.

[43] **Иудин Д.И., Трахтенгерц В.Ю.** Нелинейная динамика грозового облака // *Известия ВУЗов Радиофизика*. 2001. Т. 44. № 5-6. С. 419–438, DOI: 10.1023/A:1017945129828

[44] **Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A.** Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD031360, DOI: 10.1029/2019JD031360

- [45] Григорьев Е.Г., Перлович Ю.А., Соловьев Г.И., Удовский А.Л., Якушин В.Л. Физическое материаловедение: Учебник для вузов. Под общей ред. Калина Б.А. Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование. М.: МИФИ, 2008. 696 с.
- [46] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.: МФТИ, 1997. 320 с.
- [47] Rison W., Krehbiel P.R., Stock M.G., Edens H.E., Shao X.-M., Thomas R.J., Stanley M.A., Zhang Y. Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms, *Nature Communications*, 7 (2016) 10721, DOI: 10.1038/ncomms10721
- [48] Tilles J.N., Liu N., Stanley M.A., Krehbiel P.R., Rison W., Stock M.G., Dwyer J.R., Brown R., Wilson J. Fast negative breakdown in thunderstorms, *Nature Communications*, 10 (1) (2019) 1648, DOI: 10.1038/s41467-019-09621-z

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СЫСОЕВ Артем Андреевич — доцент, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), канд. физ.-мат. наук.*

E-mail: asysoev@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8786-6744>

ИУДИН Дмитрий Игоревич — заведующий кафедрой, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), д-р биол. наук.*

E-mail: iudin@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8416-9377>

РАКОВ Владимир Александрович — директор международного центра исследования молнии, *Флоридский университет, канд. техн. наук.*

E-mail: rakov@ece.ufl.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4582-9483>

ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Александрович — младший научный сотрудник, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), без степени.*

E-mail: alexey@sorta-nn.ru

КЛИМАШОВ Виталий Юрьевич — младший научный сотрудник, *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук (ИПФ РАН), без степени.*

E-mail: klim.nnov@gmail.com

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

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

REFERENCES

- [1] A.A. Sysoyev, D.I. Iudin, V.A. Rakov, A.A. Yemelyanov, V.Yu. Klimashov, N.V. Korovkin, Chislennoye modelirovaniye silnotochnykh atmosferynykh razryadov s uchetom termodinamiki plazmennyykh kanalov. Ch. 1. Opisanie modeli // *Globalnaya energiya*. 2023. T. 29. № 4. S. khkh, DOI: khkh

- [2] **D.I. Iudin, V.A. Rakov, A.A. Syssoev, A.A. Bulatov, M. Hayakawa**, From decimeter-scale elevated ionic conductivity regions in the cloud to lightning initiation, *Scientific Reports*, 11 (1) (2021) 18016, DOI: 10.1038/s41598-021-97321-4
- [3] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin, F.D. Iudin, V.Yu. Klimashov, A.A. Emelyanov**, Relay charge transport in thunderclouds and its role in lightning initiation, *Scientific Reports*, 12 (1) (2022) 7090, DOI: 10.1038/s41598-022-10722-x
- [4] **L.M. Coleman, M. Stolzenburg, T.C. Marshall, M. Stanley**, Horizontal lightning propagation, preliminary breakdown, and electric potential in New Mexico thunderstorms, *Journal of Geophysical Research*, 113 (2008) D09208, DOI: 10.1029/2007JD009459
- [5] **N.A. Ahmad, M. Fernando, Z.A. Baharudin, V. Cooray, H. Ahmad, Z. Abdul Malek**, Characteristics of narrow bipolar pulses observed in Malaysia, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 72 (5–6) (2010) 534–540, DOI: 10.1016/j.jastp.2010.02.006
- [6] **A. Nag, V.A. Rakov, D. Tsalikis, J.A. Cramer**, On phenomenology of compact intracloud lightning discharges, *Journal of Geophysical Research*, 115 (2010) D14115, DOI: 10.1029/2009JD012957
- [7] **A. Nag, V.A. Rakov, J.A. Cramer**, Remote measurements of currents in cloud lightning discharges, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53 (2) (2011) 407–413, DOI: 10.1109/TEMC.2010.2073470
- [8] **M. Stolzenburg, T.C. Marshall, S. Karunarathne, N. Karunarathna, L.E. Vickers, T.A. Warner, R.E. Orville, H.-D. Betz**, Luminosity of initial breakdown in lightning, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 2918–2937, DOI: 10.1002/jgrd.50276
- [9] **M. Stolzenburg, T.C. Marshall, S. Karunarathne, N. Karunarathna, R.E. Orville**, Leader observations during the initial breakdown stage of a lightning flash, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (2014) 12,198–12,221, DOI: 10.1002/2014JD021994
- [10] **S. Karunarathne, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, N. Karunarathna**, Observations of positive narrow bipolar pulses, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (2015) 7128–7143, DOI: 10.1002/2015JD023150
- [11] **N. Karunarathne, T.C. Marshall, S. Karunarathne, M. Stolzenburg**, Studying sequences of initial breakdown pulses in cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD032104, DOI: 10.1029/2019JD032104
- [12] **I. Kolmašová, O. Santolík, T. Farges, S.A. Cummer, R. Lán, L. Uhlíř**, Subionospheric propagation and peak currents of preliminary breakdown pulses before negative cloud-to-ground lightning discharges, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1382–1391, DOI: 10.1002/2015GL067364
- [13] **E.M. Smith, T.C. Marshall, S. Karunarathne, R. Siedlecki, M. Stolzenburg**, Initial breakdown pulse parameters in intracloud and cloud-to-ground lightning flashes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (2018) 2129–2140, DOI: 10.1002/2017JD027729
- [14] **S. Bandara, T. Marshall, S. Karunarathne, M. Stolzenburg**, Electric field change and VHF waveforms of positive narrow bipolar events in Mississippi thunderstorms, *Atmospheric Research*, 243 (2020) 105000, DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105000
- [15] **S. Bandara, T. Marshall, M. Stolzenburg**, Further studies of positive narrow bipolar events detected at close range, *Atmospheric Research*, 286 (2023) 106668, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.106668
- [16] **V.A. Rakov, M.D. Tran, Y. Zhu, Z. Ding, A.F.R. Leal, I. Kereszy, S. Chen**, New insights into the lightning discharge processes, *Plasma Sources Science and Technology*, 31 (2022) 104005, DOI: 10.1088/1361-6595/ac9330
- [17] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.N. Karashtin, Yu.V. Shlyugaev**, Radiation electric field produced by the lightning leader formation in a thundercloud: Observations and modeling, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 221 (2021) 105686, DOI: 10.1016/j.jastp.2021.105686
- [18] **H. Zhang, G. Lu, X. Qie, R. Jiang, Y. Fan, Y. Tian, Z. Sun, M. Liu, Z. Wang, D. Liu, G. Feng**, Locating narrow bipolar events with single-station measurement of low-frequency magnetic fields, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 143–144 (2016) 88–101, DOI: 10.1016/j.jastp.2016.03.009
- [19] **A.F.R. Leal, V.A. Rakov**, A study of the context in which compact intracloud discharges occur, *Scientific Reports*, 9 (2019) 12218, DOI: 10.1038/s41598-019-48680-6

- [20] **D.A. Smith, M.J. Heavner, A.R. Jacobson, X.M. Shao, R.S. Massey, R.J. Sheldon, K.C. Wiens**, A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records, *Radio Science*, 39 (2004) RS1010, DOI: 10.1029/2002RS002790
- [21] **I. Kolmasova, T. Marshall, S. Bandara, S. Karunaratne, M. Stolzenburg, N. Karunaratne, R. Siedlecki**, Initial breakdown pulses accompanied by VHF pulses during negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 46 (2019) 5592–5600, DOI: 10.1029/2019GL082488
- [22] **I. Kolmašová, O. Santolík, T. Farges, W. Rison, R. Lán, L. Uhlíř**, Properties of the unusually short pulse sequences occurring prior to the first strokes of negative cloud-to-ground lightning flashes, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 5316–5324, DOI: 10.1002/2014GL060913
- [23] **F. Lyu, S.A. Cummer, G. Lu, X. Zhou, J. Weinert**, Imaging lightning intracloud initial stepped leaders by low-frequency interferometric lightning mapping array, *Geophysical Research Letters*, 43 (2016) 1–8, DOI: 10.1002/2016GL069267
- [24] **J.D. Hill, M.A. Uman, D.M. Jordan**, High-speed video observations of a lightning stepped leader, *Journal of Geophysical Research*, 116 (2011) D16117, DOI: 10.1029/2011jd015818
- [25] **D.A. Petersen, W.H. Beasley**, High-speed video observations of a natural negative stepped leader and subsequent dart-stepped leader, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (2013) 12,110–12,119, DOI: 10.1002/2013jd019910
- [26] **Q. Qi, W. Lu, Y. Ma, L. Chen, Y. Zhang, V.A. Rakov**, High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance, *Atmospheric Research*, 178–179 (2016) 260–267, DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.03.027
- [27] **J.R. Dwyer, M.A. Uman**, The physics of lightning, *Physics Reports*, 534 (4) (2014) 147–241, DOI: 10.1016/j.physrep.2013.09.004
- [28] **O. Scholten, B.M. Hare, J. Dwyer, N. Liu, C. Sterpka, S. Buitink, A. Corstanje, H. Falcke, T. Huege, J.R. Hörandel, G.K. Krampah, P. Mitra, K. Mulrey, A. Nelles, H. Pandya, J.P. Rachen, T.N.G. Trinh, S. ter Veen, S. Thoudam, T. Winchen**, Distinguishing features of high altitude negative leaders as observed with LOFAR, *Atmospheric Research*, 260 (2021) 105688, DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105688
- [29] **O. Scholten, B.M. Hare, J. Dwyer, N. Liu, C. Sterpka, S. Buitink, T. Huege, A. Nelles, S. ter Veen**, Time resolved 3D interferometric imaging of a section of a negative leader with LOFAR, *Physical Review D*, 104 (2021) 063022, DOI: 10.1103/PhysRevD.104.063022
- [30] **H.E. Edens, K.B. Eack, W. Rison, S.J. Hunyady**, Photographic observations of streamers and steps in a cloud-to-air negative leader, *Geophysical Research Letters*, 41 (2014) 1336–1342, DOI: 10.1002/2013GL059180
- [31] **P. Ortega, P. Domens, A. Gibert, B. Hutzler, G. Riquel**, Performance of a 16.7 m air rod-plane gap under a negative switching impulse, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27 (1994) 2379–2387, DOI: 10.1088/0022-3727/27/11/019
- [32] **A.A. Syssoev, D.I. Iudin**, Numerical simulation of electric field distribution inside streamer zones of positive and negative lightning leaders, *Atmospheric Research*, 295 (2023) 107021, DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107021
- [33] **D.I. Iudin, V.A. Rakov, A.A. Syssoev, A.A. Bulatov, M. Hayakawa**, Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds, *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2 (46) (2019) 1–10, DOI: 10.1038/s41612-019-0102-8
- [34] **M.M. Nudnova, A.Y. Starikovskii**, Development of streamer flash initiated by HV pulse with nanosecond rise time, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36 (2008) 896–897, DOI: 10.1109/TPS.2008.920289
- [35] **H.-D. Betz, T.C. Marshall, M. Stolzenburg, K. Schmidt, W.P. Oettinger, E. Defer, J. Konarski, P. Laroche, F. Dombai**, Detection of in-cloud lightning with VLF/LF and VHF networks for studies of the initial discharge phase, *Geophysical Research Letters*, 35 (2008) L23802, DOI: 10.1029/2008GL035820
- [36] **A.F.R. Leal, V.A. Rakov, B.R.P. Rocha**, Compact intracloud discharges: New classification of field waveforms and identification by lightning locating systems, *Electric Power Systems Research*, 173 (2019) 251–262, DOI: 10.1016/j.epsr.2019.04.016

- [37] V. Cooray, G. Cooray, M. Rubinstein, F. Rachidi, Modeling compact intracloud discharge (CID) as a streamer burst, *Atmosphere*, 11 (5) (2020) 549, DOI: 10.3390/atmos11050549
- [38] A.Yu. Kostinskiy, V.S. Syssoev, N.A. Bogatov, E.A. Mareev, M.G. Andreev, L.M. Makalsky, D.I. Sukharevsky, V.A. Rakov, Observation of a new class of electric discharges within artificial clouds of charged water droplets and its implication for lightning initiation within thunderclouds, *Geophysical Research Letters*, 42 (2015) 8165–8171, DOI: 10.1002/2015GL065620
- [39] A.Yu. Kostinskiy, N.A. Bogatov, V.S. Syssoev, E.A. Mareev, M.G. Andreev, M.U. Bulatov, D.I. Sukharevsky, V.A. Rakov, Unusual plasma formations produced by positive streamers entering the cloud of negatively charged water droplets, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127 (2022) e2021JD035821, DOI: 10.1029/2021JD035821
- [40] D.I. Iudin, S.S. Davydenko, Fraktalnaya model kompaktnogo vnutrioblachnogo razryada. I. Osobennosti stroyeniya i evolyutsii // *Izvestiya VUZov. Radiofizika*. 2015. T. 58. № 7. С. 530551.
- [41] V.Yu. Trakhtengerts, O prirode elektricheskikh yacheyek v grozovom oblake // *Doklady AN SSSR*. 1989. T. 308. № 3. S. 584–586.
- [42] E.A. Mareev, A.E. Sorokin, V.Yu. Trakhtengerts, Effects of collective charging in a multifold aerosol plasma, *Plasma Physics Reports*, 25(3) (1999) 261–272.
- [43] D.I. Iudin, V.Yu. Trakhtengerts, Nelineynaya dinamika grozovogo oblaka // *Izvestiya VUZov Radiofizika*. 2001. T. 44. № 5-6. S. 419–438, DOI: 10.1023/A:1017945129828
- [44] A.A. Syssoev, D.I. Iudin, A.A. Bulatov, V.A. Rakov, Numerical simulation of stepping and branching processes in negative lightning leaders, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125 (2020) e2019JD031360, DOI: 10.1029/2019JD031360
- [45] Ye.G. Grigoryev, Yu.A. Perlovich, G.I. Solovyev, A.L. Udovskiy, V.L. Yakushin, *Fizicheskoye materialovedeniye: Uchebnik dlya vuzov. Pod obshchey red. Kalina B.A. Tom 4. Fizicheskiye osnovy prochnosti. Radiatsionnaya fizika tverdogo tela. Kompyuternoye modelirovaniye*. M.: MIFI, 2008. 696 s.
- [46] E.M. Bazelyan, Yu.P. Rayzer, *Iskrovoy razryad*. M.: MFTI, 1997. 320 s.
- [47] W. Rison, P.R. Krehbiel, M.G. Stock, H.E. Edens, X.-M. Shao, R.J. Thomas, M.A. Stanley, Y. Zhang, Observations of narrow bipolar events reveal how lightning is initiated in thunderstorms, *Nature Communications*, 7 (2016) 10721, DOI: 10.1038/ncomms10721
- [48] J.N. Tilles, N. Liu, M.A. Stanley, P.R. Krehbiel, W. Rison, M.G. Stock, J.R. Dwyer, R. Brown, J. Wilson, Fast negative breakdown in thunderstorms, *Nature Communications*, 10 (1) (2019) 1648, DOI: 10.1038/s41467-019-09621-z

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Artem A. SYSOEV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)*.

E-mail: asysoev@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8786-6744>

Dmitry I. IUDIN – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)*.

E-mail: iudin@ipfran.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8416-9377>

Vladimir A. RAKOV – *University of Florida*.

E-mail: rakov@ece.ufl.edu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4582-9483>

Aleksey A. EMELYANOV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*

E-mail: alexey@sorta-nn.ru

Vitaly Yu. KLIMASHOV – *Federal research center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS).*

E-mail: klim.nnov@gmail.com

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

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Поступила: 30.11.2023; Одобрена: 14.03.2024; Принята: 28.03.2024.

Submitted: 30.11.2023; Approved: 14.03.2024; Accepted: 28.03.2024.

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30108>



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

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

✉ erutin@inbox.ru

СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ АМОРФНО- НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА

Аннотация. В работе представлены результаты исследования микроструктуры и фазового состава, а также влияния стратегии сканирования и толщины наносимого слоя порошка в процессе селективного лазерного плавления на относительную плотность компактного аморфно-нанокристаллического магнитомягкого сплава на основе кобальта 86КГСР. Показано, что применение альтернативной стратегии сканирования позволяет увеличить относительную плотность компактного материала. Применение рентгеноструктурного анализа, а также оптической и сканирующей электронной микроскопии позволило получить данные о фазовом составе, относительной плотности и микроструктуры сплава. Результаты исследования могут быть использованы для дальнейшего исследования и разработки технологии получения композитных магнитомягких материалов на основе кобальта с помощью селективного лазерного плавления.

Ключевые слова: Селективное лазерное плавление, аморфный сплав, магнитомягкий сплав, стратегия сканирования, аддитивные технологии, сплав кобальта.

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

Для цитирования:

Ерутин Д.П., Попович А.А., Суфияров В.Ш. Селективное лазерное плавление аморфно-нанокристаллического сплава на основе кобальта // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 136–145. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30108>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30108>*D.P. Erutin* ✉, *A.A. Popovich*, *V.Sh. Sufiiarov*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ erutin@inbox.ru

SELECTIVE LASER MELTING OF COBALT-BASED AMORPHOUS ALLOY

Abstract. The paper presents the results of the study of microstructure and phase composition, as well as the influence of scanning strategy and thickness of the applied powder layer during selective laser melting on the relative density of a compact amorphous-nanocrystalline soft-magnetic alloy based on cobalt 86KGSR. It is shown that the application of an alternative scanning strategy can increase the relative density of the compact material. The X-ray diffraction analysis as well as optical and scanning electron microscopy provided data on the phase composition, relative density and microstructure of the alloy. The results of the study can be used for further research and development of a technology for obtaining composite amorphous-nanocrystalline soft-magnetic cobalt-based materials by selective laser melting.

Keywords: selective laser melting, amorphous alloy, magnetically soft alloy, scanning strategy, additive technology, cobalt alloy.

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

Citation:

D.P. Erutin, A.A. Popovich, V.Sh. Sufiiarov, Selective laser melting of cobalt-based amorphous alloy, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 136–145, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30108>

Введение. Разупорядоченное расположение атомов металлической аморфной фазы вещества является результатом сверхбыстрого охлаждения расплава, приводящего к фиксации исходных положений атомов в жидкости [1]. За счет отсутствия дальнего порядка в расположении атомов в структуре аморфной фазы отсутствует анизотропия конструкционных и функциональных свойств, поскольку дефекты кристаллического строения, являющиеся ее источником, не могут существовать в подобных условиях.

Данные особенности структурного состояния металлических аморфных материалов обуславливают их выдающиеся механические, коррозионные и магнитомягкие свойства, благодаря которым подобные сплавы получили широкое распространение в электротехническом машиностроении в качестве материалов магнитопроводящих элементов [2, 3].

Объемные металлические аморфные сплавы, как правило, получают с использованием классических производственных технологий, таких как литье в медные формы, охлаждаемые водой, термопластическое формование и спиннингование. Однако, номенклатура изделий из аморфных сплавов, которые возможны для получения в рамках классических технологий, сильно ограничена, поскольку данные технологии не позволяют получать изделия с произвольными формой и большим размером, что связано с недостаточностью достигаемых скоростей охлаждения расплава для полной аморфизации объема материала [4–5].

Использование технологий аддитивного производства, а в частности, метода селективного лазерного плавления, создает возможности для преодоления ограничений, накладываемых

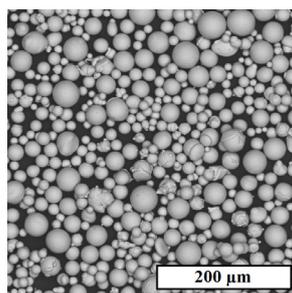


Рис. 1. СЭМ-изображение частиц исходного порошка 86КГСР
 Fig. 1. SEM-image of the initial 86KGSR powder particles

использованием классических технологий получения объемных аморфных сплавов. Применение сфокусированного высокоэнергетического источника энергии (лазера) для многократного повторения процессов нанесения и выборочного плавления слоя порошка толщиной в среднем 20–60 мкм позволяет добиться скорости охлаждения расплавленного слоя до 10^6 К/с, что открывает множество возможностей для получения объемных изделий сложной геометрии на базе аморфных сплавов в процессе их послойного синтеза.

В последние годы аддитивные технологии, в том числе метод селективного лазерного плавления, притягивают все больший интерес со стороны научно-производственного сообщества. Научные коллективы из отечественных и зарубежных университетов и научно-исследовательских центров заняты разработкой технологии получения различного рода материалов в процессе селективного лазерного плавления [6–8].

Для того, чтобы сделать возможным получение объемных аморфных и аморфно-нанокристаллических изделий в процессе селективного лазерного плавления, различные исследовательские группы заняты исследованием влияния программных параметров процесса [9–16], температуры рабочей подложки [17], стратегии сканирования [18–21] и подмешивания дополнительных материалов к исходному порошку [22–24] на структурно-фазовое состояние получаемого компактного материала.

На данный момент среди аморфных магнитомягких сплавов наиболее активные исследования проводятся в области формирования структуры материалов на основе железа [7, 9, 11, 12, 14, 16, 20]. Кобальтовые аморфные и аморфно-нанокристаллические сплавы на сегодняшний день являются слабо изученными в контексте формирования их структуры при получении объемных изделий методом селективного лазерного плавления.

В связи с вышеозначенным, целью данной работы является исследование влияния стратегии сканирования и толщины наносимого слоя порошка в процессе селективного лазерного плавления на относительную плотность компактного аморфно-нанокристаллического магнитомягкого сплава на основе кобальта, а также определение его микроструктуры и фазового состава.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала был использован порошок аморфно-нанокристаллического сплава на основе кобальта 86КГСР. Порошковый материал был получен технологией газовой атомизации и представлен частицами сферической морфологии со средним размером 26,2 мкм.

Структура полученных образцов до и после травления в 25% растворе азотной кислоты в спирте исследовалась с применением оптического микроскопа Leica DMI5000. Анализ относительной плотности материала и оценка содержания аморфной фазы были произведены при помощи программного обеспечения ImageJ путем определения доли светлых областей на контрастных изображениях структуры до и после травления соответственно.

Микроструктура полученных образцов и порошкового материала исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Tescan Mira3 LMU.

Фазовый состав образцов исследовался с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance на медном излучении излучения $K\alpha$ ($1\ 1/4\ 1,5418\ \text{\AA}$).

Образцы были получены в системе селективного лазерного плавления 3DLAM Mini, оснащенной YLR-лазером с максимальной мощностью 300 Вт, в атмосфере аргона.

Результаты исследования

Компактные образцы геометрии эллиптической призмы (20 x 10 x 5 мм) были успешно изготовлены в атмосфере аргона. Используемые для изготовления образцов параметры селективного лазерного плавления представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы селективного лазерного плавления, использованные для изготовления образцов
(**P** – мощность лазера, **V** – скорость сканирования, **h** – расстояние между проходами лазера,
t – толщина наносимого порошкового слоя)

Table 1

**Selective laser melting modes used to manufacture samples (P – laser power,
V – scanning speed, h – hatch distance, t – powder layer thickness)**

Режим	P, Вт	V, мм/с	h, мм	t, мм	Стратегия
1	150	800	0,08	0,02	Линейная
2	150	800	0,08	0,03	Линейная
3	150	800	0,08	0,03	Квадратичная

Помимо варьирования толщины наносимого слоя порошка также производилось варьирование стратегии его сканирования лазерным лучом. В процессе сканирования слоя по линейной стратегии последовательное проплавление необходимой области порошка происходит путем выполнения линейных проходов лазерного луча длиной 5 мм. Стратегия сканирования, обозначенная в данной работе как квадратичная (в литературе также упоминаемая как шахматная), предполагает выполнение линейных проходов лазерного луча в рамках квадратов 5 x 5 мм таким образом, что в двух любых квадратах, соседних по вертикали или горизонтали, проходы лазерного луча производятся взаимно перпендикулярно. Во избежание образования дефектов неплавления по границам квадратов была установлена величина перекрытия (наложение границы одного квадрата на границу соседнего квадрата), составляющая 0,1 мм. Принципиальная схема описанных стратегий сканирования представлена на рис. 2.

Изображения макроструктуры компактного материала, полученные с помощью оптического микроскопа, представлены на рис. 3.

Полученная макроструктура материала характеризуется распределенной пористостью, а также наличием макроскопических трещин. Величины относительной плотности образцов были определены с помощью анализа оптических изображений их макроструктуры и составили 96,6%, 97,2% и 99,1% для режимов 1, 2 и 3 соответственно. Сравнение особенностей макроструктуры материала, полученного с использованием различных режимов, позволяет сделать вывод о том, что при использовании меньшей толщины слоя (20 мкм) имеет место возникновение пор типа замочной скважины (округлые поры размером 3–5 мкм), связанное с перегревом и испарением жидкого расплава. При этом увеличение толщины слоя до 30 мкм при использовании той же линейной стратегии сканирования позволило избавиться от пор такого типа и немного увеличить относительную плотность материала, однако, наиболее значительное влияние на данный параметр

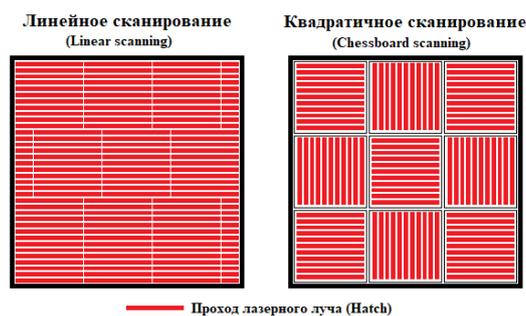


Рис. 2. Схема используемых в эксперименте стратегий сканирования

Fig. 2. Layout of the scanning strategies used in the experiment

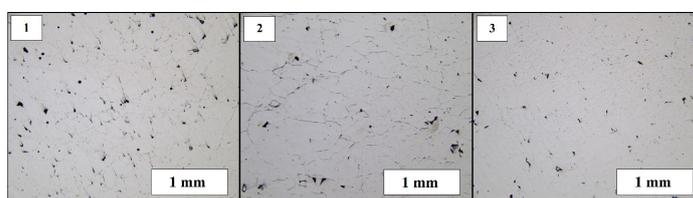


Рис. 3. Макроструктура компактного материала, полученного селективным лазерным плавлением

Fig. 3. Macrostructure of the compact material obtained via selective laser melting

оказала стратегия сканирования порошкового слоя. Переход от линейной стратегии сканирования к квадратичной позволил существенно увеличить относительную плотность материала. Несмотря на то, что поры неправильной формы сохраняются в структуре компактного материала при переходе к альтернативной стратегии сканирования, количество и размер макроскопических трещин значительно уменьшились. Наблюдаемый эффект снижения количества дефектов компактного материала при увеличении толщины слоя связан с устранением пор типа замочной скважины, происходящим за счет уменьшения объемной плотности энергии и деинтенсификации испарения жидкого металла в процессе послойного синтеза, в то время как уменьшение дефектности при переходе от линейной стратегии сканирования к стратегии сканирования по квадратам с перекрытием связан с эффективным перераспределением полей внутренних напряжений, возникающих вследствие многократных циклических фазовых переходов жидкость-твердое вещество и температуры компактного материала. Дальнейшее исследование проводилось на материале, полученном с помощью режима 3, поскольку данный режим обеспечил получение наименее дефектной структуры в рамках представленной работы.

Фазовый состав порошкового и компактного материалов (рис. 4) исследовался методом рентгеновской дифрактометрии и характеризуется существованием аморфной фазы, на что указывает наличие гало на рентгенограмме, а также присутствием в структуре трех кристаллических фаз: твердого раствора на основе α -Co, дисилицида железа FeSi_2 и Mn_5Si_2 . Видно, что полученные дифрактограммы различаются по распределению интенсивности кристаллических пиков, однако оба материала характеризуются идентичным фазовым составом.

Исследование структуры компактного материала после травления (рис. 5) позволило оценить долю аморфной фазы, не подверженной воздействию травителя в силу своих специфических коррозионных свойств, в структуре материала. Оценка содержания аморфной фазы в материале, полученная с помощью программы анализа изображений, составила 41% для компактного материала.

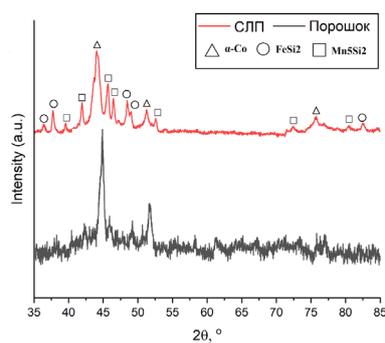


Рис. 4. Дифрактограммы порошкового материала и компактного материала, полученного с использованием различных режимов селективного лазерного плавления

Fig. 4. Diffractograms of powder material and compact material obtained using different modes of selective laser melting

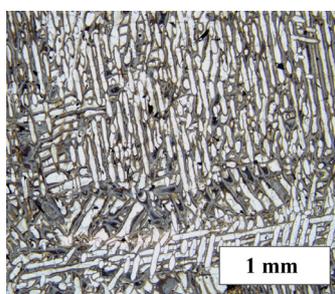


Рис. 5. Структура материала, полученного с применением квадратичной стратегии сканирования, после травления

Fig. 5. Post-etching structure of the material obtained using a chessboard scanning strategy

Микроструктура синтезированного материала исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии, изображения представлены на рис. 6.

Компактный материал характеризуется типичной для металлического селективного лазерного плавления структурой, представленной зонами термического влияния, перехода и основного металла. Зона основного металла представлена аморфной фазой на основе кобальта, а переходная зона образована столбчатыми кристаллами твердого раствора α -Co. Зона термического влияния, в свою очередь, представляет из себя область выделения наноразмерных включений дисилицида железа FeSi_2 и Mn_3Si_2 в матрице α -Co.

Заключение

В рамках представленной работы были получены данные о структуре и фазовом составе компактного аморфно-нанокристаллического кобальтового сплава 86КГСР, полученного в процессе послойного синтеза из порошкового материала по технологии селективного лазерного плавления. Результаты исследования свидетельствуют о том, что относительная плотность образцов увеличивается как при использовании в качестве параметров синтеза увеличенной с 20 до 30 мкм толщины порошкового слоя, так и при переходе от линейного сканирования к квадратичной стратегии. Макроструктура наименее дефектного образца (относительная плотность 99,07%), полученного при использовании вышеозначенных параметров, характеризуется наличием распределенных пор неправильной формы, указывающих на недостаточное проплавление в местах их расположения в объеме, а также микроскопических трещин, однако, увеличение толщины

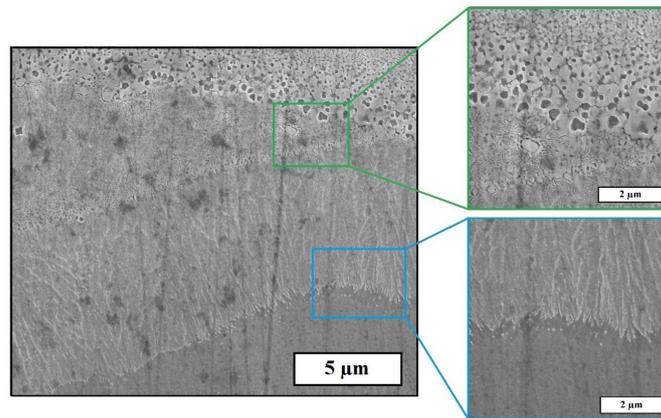


Рис. 6. СЭМ-изображения микроструктурных областей компактного материала, полученного с применением квадратичной стратегии сканирования

Fig. 6. SEM-images of microstructural regions of compact material obtained using a chessboard scanning strategy

порошкового слоя позволило избавиться от присутствия пор типа замочной скважины в структуре за счет деинтенсификации процесса испарения жидкого металла. Дальнейшие исследования проводились для наименее дефектного образца компактного материала, полученного с использованием квадратичного сканирования и увеличенной толщины слоя. Компактный материал характеризуется структурой, типичной для металлического селективного лазерного плавления и представлен зонами термического влияния, перехода и основного металла. Зона основного металла представлена аморфной фазой на основе кобальта, а переходная зона образована столбчатыми кристаллами твердого раствора α -Co. Зона термического влияния, в свою очередь, представляет из себя область выделения наноразмерных включений дисилицида железа FeSi_2 и Mn_3Si_2 в матрице α -Co, при этом оценка содержания аморфной фазы в материале, полученном с применением квадратичной стратегии сканирования, составила 41%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Turnbull D., Cohen M.H.** Free-Volume Model of the Amorphous Phase: Glass Transition, *Journal of Chemical Physics*. 34 (1) (1961) 120–125.
- [2] **Stachurski Z.H.** On Structure and Properties of Amorphous Materials, *Materials*. 4 (9) (2011) 1564–1598.
- [3] **Masumoto T., Hashimoto K.** Chemical properties of amorphous metals, *Annual Review of Materials Science*. 8 (1) (1978) 215–233.
- [4] **Zhang P., Tan J., Tian Y., Yan H., Yu Z.** Research progress on selective laser melting (SLM) of bulk metallic glasses (BMGs): a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. (2021) 1–41.
- [5] **Song B., Zhao X., Li S., Han C., Wei Q., Wen S., Shi Y.** Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: A review, *Frontiers of Mechanical Engineering*. 10 (2015) 111–125.
- [6] **Popovich A.A., Sufiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V.** Design and manufacturing of tailored microstructure with selective laser melting. *Materials Physics and Mechanics*. 38 (1) (2018) 1–10.
- [7] **Zhang M., Yang Y., Wang D., Xiao Z., Song C., Weng C.** Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V gradient structures manufactured by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*. 736 (2018) 288–297.

- [8] **Nazarov A., Safronov V.A., Khmyrov R.S., Shishkovsky I.** Fabrication of gradient structures in the Ni-Al system via SLM process, *Procedia IUTAM*. 23 (2017) 161–166.
- [9] **Sufiiarov V., Erutin D., Borisov E., Popovich A.** Selective Laser Melting of Inconel 718/TiC Composite: Effect of TiC Particle Size, *Metals*. 12 (10) (2022) 1729.
- [10] **Sufiiarov V.S., Popovich A.A., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Orlov A.V.** The Effect of Layer Thickness at Selective Laser Melting, *Procedia Engineering*. 174 (2017) 126–134.
- [11] **Polozov I.A., Sufiiarov V.S., Popovich A.A., Masaylo D.V., Grigoriev A.** Synthesis of Ti-5Al, Ti-6Al-7Nb, and Ti-22Al-25Nb alloys from elemental powders using powder-bed fusion additive manufacturing, *Journal of Alloys and Compounds*. 763 (2018) 436–445.
- [12] **Jiang Q., Liu H., Li J., Yang D., Zhang Y., Yang W.** Atomic-level understanding of crystallization in the selective laser melting of Fe₅₀Ni₅₀ amorphous alloy, *Additive Manufacturing*. 34 (2020) 101369.
- [13] **Sufiiarov V.S., Erutin D.P., Kantyukov A.D., Borisov E.V., Popovich A.A., Nazarov D.V.** Structure, Mechanical and Magnetic Properties of Selective Laser Melted Fe-Si-B Alloy, *Materials*. 15 (12) (2022) 4121.
- [14] **Erutin D.P., Borisov E.V., Popovich A.A., Sufiiarov V.S.** Magnetic anisotropy of a selective laser melted Fe-Si-B alloy, *Proceedings of the 2022 8th Asia Conference on Mechanical Engineering and Aerospace Engineering*, Wuhan. 2361 (2022) 012011.
- [15] **Jiang Q., Zhang P., Tan J., Yu Z., Tian Y., Ma S., Wu D.** Influence of the microstructure on mechanical properties of SLM additive manufacturing Fe-based bulk metallic glasses, *Journal of Alloys and Compounds*. 894 (2022) 162525.
- [16] **Xing W., Ouyang D., Li N., Liu L.** Estimation of residual stress in selective laser melting of a Zr-based amorphous alloy, *Materials*. 11 (8) (2018) 1480.
- [17] **Ozden M.G., Morley N.A.** Laser additive manufacturing of Fe-based magnetic amorphous alloys, *Magnetochemistry*. 7 (2) (2021) 20.
- [18] **Thakkar R., Jara M.O., Swinnea S., Pillai A.R., Maniruzzaman M.** Impact of laser speed and drug particle size on selective laser sintering 3D printing of amorphous solid dispersions, *Pharmaceutics*. 13 (8) (2021) 1149.
- [19] **Ouyang D., Xing W., Li N., Li Y., Liu L.** Structural evolutions in 3D-printed Fe-based metallic glass fabricated by selective laser melting, *Additive Manufacturing*. 23 (2018) 246–252.
- [20] **Li X.P., Roberts M., Liu Y.J., Kang C.W., Huang H., Sercombe T.B.** Effect of substrate temperature on the interface bond between support and substrate during selective laser melting of Al-Ni-Y-Co-La metallic glass, *Materials & Design*. 65 (2015) 1–6.
- [21] **Żrodowski L., Wysocki B., Wróblewski R., Kurzydłowski K.J., Świążkowski W.** The novel scanning strategy for fabrication metallic glasses by selective laser melting, *Laser*. 20 (20) (2016) 20.
- [22] **Nam Y.G., Koo B., Chang M.S., Yang S., Yu J., Park Y.H., Jeong J.W.** Selective laser melting vitrification of amorphous soft magnetic alloys with help of double-scanning-induced compositional homogeneity, *Materials Letters*. 261 (2020) 127068.
- [23] **Jiang Q., Liu H., Li J., Yang D., Zhang Y., Yang W.** Atomic-level understanding of crystallization in the selective laser melting of Fe₅₀Ni₅₀ amorphous alloy, *Additive Manufacturing*. 34 (2020) 101369.
- [24] **Ерутин Д.П., Попович А.А., Суфияров В.Ш.** Влияние угла поворота сканирования на плотность композиционного материала 1СР/медь в процессе селективного лазерного плавления, *Глобальная энергия*. 29 (3) (2023) 90–99.
- [25] **Erutin D., Popovich A., Sufiiarov V.** Selective Laser Melting of (Fe-Si-B)/Cu Composite: Structure and Magnetic Properties Study, *Metals* (2023). 13 (2), 428.
- [26] **Gao X., Lin X., Yu J., Li Y., Hu Y., Fan W., Huang W.** Selective Laser Melting (SLM) of in-situ beta phase reinforced Ti/Zr-based bulk metallic glass matrix composite, *Scripta Materialia*. 171 (2019) 21–25.
- [27] **Gao X., Lin X., Yan Q., Wang Z., Yu X., Zhou Y., Huang W.** Effect of Cu content on microstructure and mechanical properties of in-situ β phases reinforced Ti/Zr-based bulk metallic glass matrix composite by selective laser melting (SLM), *Journal of Materials Science & Technology*. 67 (2021) 174–185.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

E-mail: erutin@inbox.ru

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

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

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

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

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

REFERENCES

- [1] **D. Turnbull, M.H. Cohen**, Free-Volume Model of the Amorphous Phase: Glass Transition, *Journal of Chemical Physics*. 34 (1) (1961) 120–125.
- [2] **Z.H. Stachurski**, On Structure and Properties of Amorphous Materials, *Materials*. 4 (9) (2011) 1564–1598.
- [3] **T. Masumoto, K. Hashimoto**, Chemical properties of amorphous metals, *Annual Review of Materials Science*. 8 (1) (1978) 215–233.
- [4] **P. Zhang, J. Tan, Y. Tian, H. Yan, Z. Yu**, Research progress on selective laser melting (SLM) of bulk metallic glasses (BMGs): a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. (2021) 1–41.
- [5] **B. Song, X. Zhao, S. Li, C. Han, Q. Wei, S. Wen, Y. Shi**, Differences in microstructure and properties between selective laser melting and traditional manufacturing for fabrication of metal parts: A review, *Frontiers of Mechanical Engineering*. 10 (2015) 111–125.
- [6] **A.A Popovich, V.S. Sufiiarov, E.V. Borisov, I.A. Polozov, D.V. Masaylo**, Design and manufacturing of tailored microstructure with selective laser melting. *Materials Physics and Mechanics*. 38 (1) (2018) 1–10.
- [7] **M. Zhang, Y. Yang, D. Wang, Z. Xiao, C. Song, C. Weng**, Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V gradient structures manufactured by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*. 736 (2018) 288–297.
- [8] **A. Nazarov, V.A. Safronov, R.S. Khmyrov, I. Shishkovsky**, Fabrication of gradient structures in the Ni-Al system via SLM process, *Procedia IUTAM*. 23 (2017) 161–166.
- [9] **V. Sufiiarov, D. Erutin, E. Borisov, A. Popovich**, Selective Laser Melting of Inconel 718/TiC Composite: Effect of TiC Particle Size, *Metals*. 12 (10) (2022) 1729.
- [10] **V.S. Sufiiarov, A.A. Popovich, E.V. Borisov, I.A. Polozov, D.V. Masaylo, A.V. Orlov**, The Effect of Layer Thickness at Selective Laser Melting, *Procedia Engineering*. 174 (2017) 126–134.
- [11] **I.A. Polozov, V.S. Sufiiarov, A.A. Popovich, D.V. Masaylo, A. Grigoriev**, Synthesis of Ti-5Al, Ti-6Al-7Nb, and Ti-22Al-25Nb alloys from elemental powders using powder-bed fusion additive manufacturing, *Journal of Alloys and Compounds*. 763 (2018) 436–445.
- [12] **Q. Jiang, H. Liu, J. Li, D. Yang, Y. Zhang, W. Yang**, Atomic-level understanding of crystallization in the selective laser melting of Fe₅₀Ni₅₀ amorphous alloy, *Additive Manufacturing*. 34 (2020) 101369.
- [13] **V.S. Sufiiarov, D.P. Erutin, A.D. Kantyukov, E.V. Borisov, A.A. Popovich, D.V. Nazarov**, Structure, Mechanical and Magnetic Properties of Selective Laser Melted Fe-Si-B Alloy, *Materials*. 15 (12) (2022) 4121.
- [14] **D.P. Erutin, E.V. Borisov, A.A. Popovich, V.S. Sufiiarov**, Magnetic anisotropy of a selective laser melted Fe-Si-B alloy, *Proceedings of the 2022 8th Asia Conference on Mechanical Engineering and Aerospace Engineering*, Wuhan. 2361 (2022) 012011.

- [15] **Q. Jiang, P. Zhang, J. Tan, Z. Yu, Y. Tian, S. Ma, D. Wu**, Influence of the microstructure on mechanical properties of SLM additive manufacturing Fe-based bulk metallic glasses, *Journal of Alloys and Compounds*. 894 (2022) 162525.
- [16] **W. Xing, D. Ouyang, N. Li, L. Liu**, Estimation of residual stress in selective laser melting of a Zr-based amorphous alloy, *Materials*. 11 (8) (2018) 1480.
- [17] **M.G. Ozden, N.A. Morley**, Laser additive manufacturing of Fe-based magnetic amorphous alloys, *Magnetochemistry*. 7 (2) (2021) 20.
- [18] **R. Thakkar, M.O. Jara, S. Swinnea, A.R. Pillai, M. Maniruzzaman**, Impact of laser speed and drug particle size on selective laser sintering 3D printing of amorphous solid dispersions, *Pharmaceutics*. 13 (8) (2021) 1149.
- [19] **D. Ouyang, W. Xing, N. Li, Y. Li, L. Liu**, Structural evolutions in 3D-printed Fe-based metallic glass fabricated by selective laser melting, *Additive Manufacturing*. 23 (2018) 246–252.
- [20] **X.P. Li, M. Roberts, Y.J. Liu, C.W. Kang, H. Huang, T.B. Sercombe**, Effect of substrate temperature on the interface bond between support and substrate during selective laser melting of Al–Ni–Y–Co–La metallic glass, *Materials & Design*. 65 (2015) 1–6.
- [21] **L. Żrodowski, B. Wysocki, R. Wróblewski, K.J. Kurzydłowski, W. Świążkowski**, The novel scanning strategy for fabrication metallic glasses by selective laser melting, *Laser*. 20 (20) (2016) 20.
- [22] **Y.G. Nam, B. Koo, M.S. Chang, S. Yang, J. Yu, Y.H. Park, J.W. Jeong**, Selective laser melting vitrification of amorphous soft magnetic alloys with help of double-scanning-induced compositional homogeneity, *Materials Letters*. 261 (2020) 127068.
- [23] **Q. Jiang, H. Liu, J. Li, D. Yang, Y. Zhang, W. Yang**, Atomic-level understanding of crystallization in the selective laser melting of Fe₅₀Ni₅₀ amorphous alloy, *Additive Manufacturing*. 34 (2020) 101369.
- [24] **D.P. Erutin, A.A. Popovich, V.S. Sufiyarov**, Effect of scanning angle on the density of ICP/copper selective laser melted composite material. *Global Energy*. 29 (3) (2023) 90–99.
- [25] **D. Erutin, A. Popovich, V. Sufiyarov**, Selective Laser Melting of (Fe–Si–B)/Cu Composite: Structure and Magnetic Properties Study, *Metals*. 13 (2) (2023) 428.
- [26] **X. Gao, X. Lin, J. Yu, Y. Li, Y. Hu, W. Fan, W. Huang**, Selective Laser Melting (SLM) of in-situ beta phase reinforced Ti/Zr-based bulk metallic glass matrix composite, *Scripta Materialia*. 171 (2019) 21–25.
- [27] **X. Gao, X. Lin, Q. Yan, Z. Wang, X. Yu, Y. Zhou, W. Huang**, Effect of Cu content on microstructure and mechanical properties of in-situ β phases reinforced Ti/Zr-based bulk metallic glass matrix composite by selective laser melting (SLM), *Journal of Materials Science & Technology*. 67 (2021) 174–185.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Danil P. ERUTIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.

E-mail: erutin@inbox.ru

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

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

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

E-mail: vadim.spbstu@yandex.ru

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

Поступила: 21.01.2024; Одобрена: 22.02.2024; Принята: 22.02.2024.

Submitted: 21.01.2024; Approved: 22.02.2024; Accepted: 22.02.2024.

Научная статья

УДК 620.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>



М.Р. Дасаев, И.С. Соколов ✉, *О.В. Рыженков,*
С.В. Григорьев, А.Ю. Лихаева, М.Р. Атауллин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Московский энергетический институт
(технический университет)», Москва, Россия

✉ sokolviv@inbox.ru

ПРИМЕНЕНИЕ PVD-ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ НА ОСНОВЕ Cr ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ СТАЛИ

Аннотация. В условиях активного развития альтернативных источников энергии проблема водородного охрупчивания ответственных элементов конструкций несомненно требует внимания. Ухудшение прочностных характеристик конструкционных материалов в контакте с водородсодержащими средами значительно повышает требования к их надежности и снижает технико-экономическую целесообразность использования водорода. В данной работе представлены результаты металлографических исследований и механических испытаний экспериментальных образцов из стали Ст20 с барьерным покрытием толщиной ≈ 2 мкм и ≈ 4 мкм на основе хрома (Cr), нанесенным с использованием PVD (Physical Vapour Deposition) технологии. Анализ морфологии и структуры покрытия, а также фрактограмм поверхности излома экспериментальных образцов показал отсутствие структурных изменений при наводороживании образцов. По результатам испытаний на растяжение отмечен положительный эффект использования барьерных покрытий большей толщины. Экспериментальные образцы с барьерным покрытием большей толщины продемонстрировали меньшее ухудшение прочностных характеристик, по сравнению с контрольным наводороженным образцом без барьерного покрытия отмечено двукратное снижение скорости ухудшения значений деформации и четырехкратное снижение скорости ухудшения предела прочности.

Ключевые слова: водородное охрупчивание, стали, PVD-технология, барьерные покрытия, механические испытания.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта «Разработка технологических основ защиты от водородного охрупчивания сталей» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.

Для цитирования:

Дасаев М.Р., Соколов И.С., Рыженков О.В. и др. Применение PVD-покрытий различной толщины на основе Cr для замедления процесса водородного охрупчивания стали // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>

M.R. Dasaev, I.S. Sokolov , O.V. Ryzhenkov,
S.V. Grigoryev, A.Y. Likhaeva, M.R. Ataullin

Moscow Power Engineering Institute (Technical University), Moscow, Russia

 sokolviv@inbox.ru

APPLICATION OF CR-BASED PVD COATINGS OF DIFFERENT THICKNESSES FOR RETARDING HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF STEEL

Abstract. In the context of active development of alternative energy sources, the problem of hydrogen embrittlement of critical structural elements undoubtedly requires attention. Deterioration of strength characteristics of structural materials in contact with hydrogen-containing media significantly increases the requirements for their reliability and reduces the technical and economic feasibility of using hydrogen. This paper presents the results of metallographic studies and mechanical tests of experimental St20 steel samples with a barrier coating with thickness of $\approx 2 \mu\text{m}$ and $\approx 4 \mu\text{m}$ on the basis of chromium (Cr), applied using PVD (Physical Vapour Deposition) technology. Analysis of morphology and structure of the coating, as well as fractograms of the fracture surface of the experimental samples showed the absence of structural changes during hydrogenation of the samples. According to the results of tensile tests, the positive effect of using barrier coatings of greater thickness was noted. Experimental samples with barrier coating of greater thickness showed less deterioration of strength characteristics, compared to the control hydrogenated sample without barrier coating. We observed a twofold decrease in the rate of deterioration of strain values and a fourfold decrease in the rate of deterioration of the tensile strength.

Keywords: hydrogen embrittlement, steels, PVD technology, barrier coatings, mechanical testing.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project “Development of technological foundations for protection against hydrogen embrittlement of steels” with the support of a grant from the National Research University “MPEI” for the implementation of the scientific research program “Priority 2030: Technologies of the Future” in 2022–2024.

Citation:

M.R. Dasaev, I.S. Sokolov, O.V. Ryzhenkov and etc., Application of Cr-based PVD coatings of different thicknesses for retarding the process of hydrogen embrittlement of steel, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 146–157, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>

Введение. Среди перспективных нетрадиционных источников энергии водород выделяется широтой возможного спектра применения [1]. Он может быть использован для накопления энергии, в том числе выработанной на возобновляемых источниках энергии, в топливных ячейках, для транспорта энергии, в качестве топлива для автомобильного транспорта, а также широко применяется в химической и металлургической промышленности [2]. Однако, так как водород способен интенсивно диффундировать в большинство конструкционных материалов [3–5], взаимодействуя с кристаллической решеткой и вызывая ухудшение прочностных свойств с последующим потенциальным разрушением подверженного воздействию элемента конструкции [6–7], его применение ограничивается необходимостью обеспечения высокой надежности элементов, неизбежно ведущей к снижению экономической целесообразности развития водородных технологий [8–10].

Водородное охрупчивание, возникающее в высокопрочных сталях, используемых в системах хранения, генерации и транспорта водорода [11], связано с тем, что атомы водорода, встраиваясь в кристаллическую решетку металла значительно снижают его прочность и пластичность [12–13]. Материал становится более хрупким, а его устойчивость к усталостному разрушению и предел прочности снижаются [14–15].

При этом водород может взаимодействовать с различными составляющими стали: встраивание атомов водорода в междоузлия кристаллической решетки железа, как было отмечено ранее, ведет к водородному охрупчиванию [16]; взаимодействие водорода с углеродом приводит к формированию метана, вызывающего внутреннее порообразование, и разрушение стали; водород формирует гидридные соединения с магнием, что ведет к хрупкости, а при реакции с серой образуется сероводород, также приводящий к возникновению трещин. В то же время, никель и хром выступают в роли водородной ловушки, адсорбируя и удерживая атомы водорода и предотвращая охрупчивание [17].

В табл. 1 приведен перечень основных элементов, входящих в состав сталей и их влияние на характер взаимодействия с водородом.

Таблица 1
Влияние элементов в составе стали на характер взаимодействия с водородом [17]

Table 1
Influence of elements in the composition of steel on the way of interaction with hydrogen [17]

Элемент	Количество водородных ловушек	Диффузия водорода	Старение стали
Алюминий (Al)	–	снижается	–
Молибден (Mo)	увеличивается	–	увеличивается
Магний (Mg)	–	увеличивается	–
Медь (Cu)	–	снижается	–
Ниобий (Nb)	увеличивается	увеличивается	увеличивается
Хром (Cr)	увеличивается	снижается	увеличивается
Углерод (C)	–	увеличивается	–
Никель (Ni)	–	снижается	–
Титан (Ti)	увеличивается	–	увеличивается
Кремний (Si)	–	снижается	–
Ванадий (V)	увеличивается	–	увеличивается
Сера (S)	–	увеличивается	–
Фосфор (P)	–	увеличивается	–

На данный момент существует множество перспективных методов защиты от водородного охрупчивания, среди которых наиболее популярными являются [18–22]: подбор материала, устойчивого к воздействию водорода; использование барьерных покрытий; обработка поверхности материала.

В данной работе исследуется эффективность барьерного покрытия различной толщины на основе Cr, нанесенного с использованием PVD технологии. Так как основной причиной охрупчивания является диффузия атомов водорода в объем стали, рассматриваемое покрытие позволит значительно замедлить данный процесс вследствие более плотной структуры и значительной водородной емкости хрома, отличающегося большим количеством водородных ловушек.

При этом PVD-покрытия характеризуются высокой износо-, термо- и коррозионной стойкостью, что обеспечивает возможность применения данных покрытий для ответственных элементов систем, работающих в контакте с коррозионно-активными и агрессивными средами при высоких значениях давления и температуры.

Материалы и методы

В качестве исходного материала для изготовления экспериментальных образцов в данной работе была выбрана обогащенная углеродом конструкционная сталь Ст20. Химический состав стали Ст20 приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав стали Ст20

Table 2

Chemical composition of St20 steel

Элемент	Доля, %
Углерод (C)	0,17 – 0,24
Кремний (Si)	0,17 – 0,37
Марганец (Mn)	0,35 – 0,65
Сера (S)	< 0,04
Фосфор (P)	< 0,04
Никель (Ni)	< 0,25
Хром (Cr)	< 0,25
Медь (Cu)	< 0,25
Мышьяк (As)	< 0,08
Железо (Fe)	~98

Условия проведения механических испытаний, а также характеристики исследуемых экспериментальных образцов аналогичны приведенным в работе [23].

Процесс наводороживания экспериментальных образцов производился с использованием установки УС-150 (ОИВТ РАН), основные элементы установки и интерфейс программы управления приведены в работе [23].

Перед началом процесса наводороживания в рабочем сосуде установки обеспечивалось давление не более 10 Па, после чего производился нагрев вакуумированного сосуда до температуры 423 К. В процессе наводороживания использовался водород высокой чистоты при давлении не менее 9 МПа. Экспериментальные образцы выдерживались в атмосфере водорода при указанных параметрах в течение 8 часов, после чего остужались и производилось извлечение образцов.

Барьерное покрытие на основе Cr формировалось в вакуумной установке «Гефест+» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»). Более подробно процесс подготовки к формированию покрытия описан в работе [23].

В рамках исследования использовалась следующая маркировка экспериментальных образцов: ибп – исходный образец без покрытия; нбп – наводороженный образец без покрытия; ип2 – исходный образец с покрытием толщиной ≈ 2 мкм; нп2 – наводороженный образец с покрытием толщиной ≈ 2 мкм; ип4 – исходный образец с покрытием толщиной ≈ 4 мкм; нп4 – наводороженный образец с покрытием, толщиной ≈ 4 мкм.

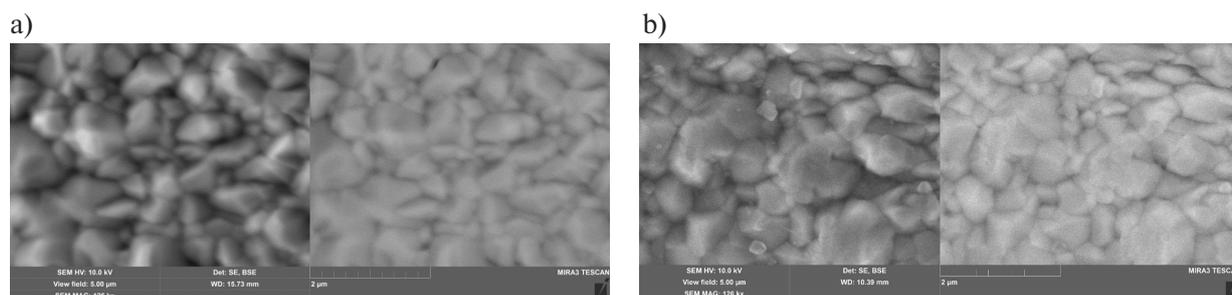


Рис. 1. Фотоснимки поверхности экспериментальных образцов с барьерным покрытием до наводороживания (а) и после наводороживания (б), полученные с использованием электронной микроскопии

Fig. 1. Electron microscopy images of the surface of experimental samples with barrier coating before hydrogenation (a) and after hydrogenation (b)

Толщина покрытия измерялась с использованием толщиномера покрытий PosiTector 6000 F90S1. Микроструктура экспериментальных образцов была исследована с использованием растрового микроскопа Tescan Mira LMU.

В области на удалении от разрыва проводились исследования микротвердости шлифов, изготовленных из экспериментальных образцов до и после наводороживания. Измерение микротвердости по Виккерсу проводилось для исходного и наводороженного экспериментальных образцов без барьерного покрытия, а также для исходного и наводороженного экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной ≈ 2 мкм, с использованием твердомера для малых нагрузок DuraScan 20. Измерения микротвердости проводились при нагрузке 0,01 кгс (0,098 Н) на глубине от $5\div 7$ мкм до ≈ 150 мкм для образцов без барьерного покрытия и на глубине от $5\div 7$ мкм до ≈ 300 мкм для образцов с барьерным покрытием.

Результаты и обсуждение

Морфология полученного барьерного покрытия для исходного и наводороженного экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной ≈ 2 мкм представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, у полученного покрытия наблюдается зернистая структура поверхности с размером зерна от 0,2 до 1,3 мкм. При этом не отмечено значимых различий структуры исходного и наводороженного экспериментальных образцов.

Характерный вид микроструктуры поверхностного слоя, полученный с использованием микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU в режиме обратно-отраженных электронов, приведен на рис. 2.

Хромовое покрытие имеет столбчатую структуру, характерную как для наводороженного (см. рис. 2, б), так и для не подвергавшегося наводороживанию (см. рис. 2, а) экспериментальных образцов. Достигнута сплошность покрытия, обеспечивающая барьерный эффект в процессе наводороживания. Структура и морфология экспериментальных образцов с различной толщиной покрытия не имеют значимых различий.

На рис. 3 представлены фрактограммы поверхности излома для исходного и наводороженного экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной ≈ 2 мкм.

В соответствии с представленными изображениями поверхность экспериментальных образцов в области разрыва имеет вид ямочного вязкого среза. На изображениях отсутствуют фасетки и сколы, характеризующие хрупкий характер разрушения. Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии значимых структурных изменений характера разрушения исследуемого материала при наводороживании. Фрактограммы поверхности экспериментальных образцов с толщиной покрытия ≈ 4 мкм не имеют значимых отличий от представленных, так как увеличение толщины покрытия характеризуется повышением барьерного эффекта.

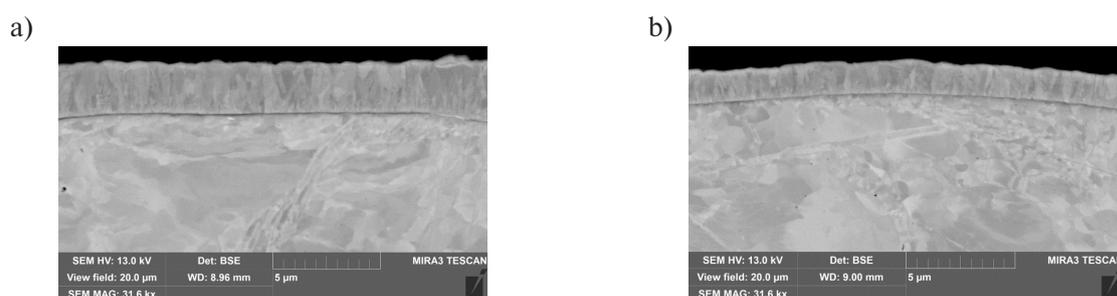


Рис. 2. Микроструктура барьерного покрытия экспериментального образца со средней толщиной ~ 2 мкм без наводороживания (a) и после наводороживания (b)

Fig. 2. Microstructure of the barrier coating of the experimental sample with an average thickness of ~ 2 microns without hydrogenation (a) and after hydrogenation (b)

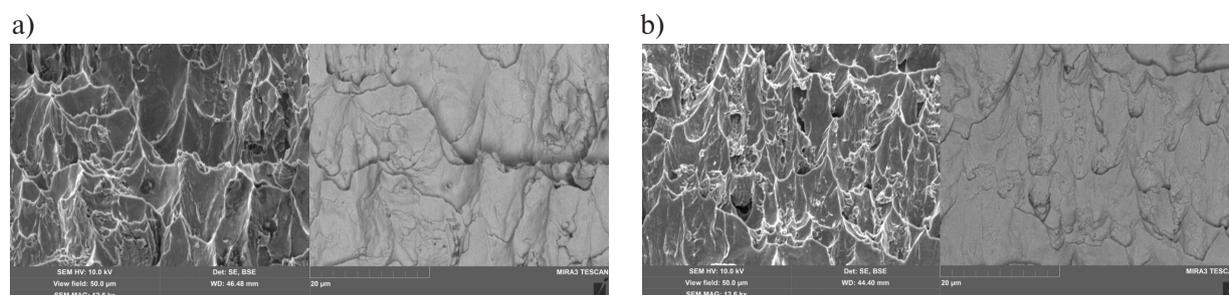


Рис. 3. Фрактограммы поверхности излома экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной ≈ 2 мкм: исходного (a), наводороженного (b)

Fig. 3. Fractograms of fracture surface of experimental samples with barrier coating with thickness ≈ 2 μm : initial (a), hydrogenated (b)

Значение микротвердости для исходного экспериментального образца без барьерного покрытия в поверхностном слое на глубине до ≈ 20 мкм в среднем составило (178 ± 8) HV, с постепенным снижением при отдалении от поверхности, до (158 ± 7) HV. Для наводороженного экспериментального образца без барьерного покрытия микротвердость в поверхностном слое на глубине до ≈ 20 мкм в среднем составила (205 ± 10) HV, затем постепенно снижалась до достижения значения (171 ± 7) HV. С учетом средних значений повышение микротвердости по результатам процесса наводороживания для экспериментальных образцов без барьерного покрытия составило ≈ 20 HV.

Для экспериментального образца без наводороживания микротвердость стали 20 в приповерхностном слое как в среднем по глубине от ≈ 7 до ≈ 100 мкм, так и в среднем по глубине от ≈ 7 до ≈ 300 мкм, составила (212 ± 10) HV. На экспериментальном образце, подвергнутом наводороживанию, микротвердость стали 20 в приповерхностном слое на глубине до ≈ 100 мкм в среднем составила (206 ± 9) HV; в среднем по глубине от ≈ 7 до ≈ 300 мкм микротвердость составила (209 ± 9) HV. Таким образом, для экспериментальных образцов с барьерным покрытием отмечается повышенное значение приповерхностной микротвердости, вызванное термической обработкой в процессе нанесения покрытия.

Выявлено повышение микротвердости экспериментального образца без барьерного покрытия при наводороживании, вызванное закреплением подвижных дислокаций в материале атомами водорода. При этом для экспериментального образца с барьерным покрытием значение микротвердости при наводороживании изменяется незначительно, что характеризует барьерные свойства покрытия. Таким образом, на основе результатов металлографических исследований

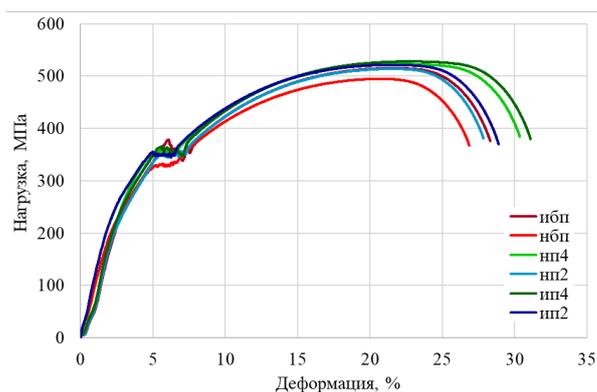


Рис. 4. Диаграммы деформации для испытанных экспериментальных образцов
 Fig. 4. Deformation diagrams for tested experimental samples

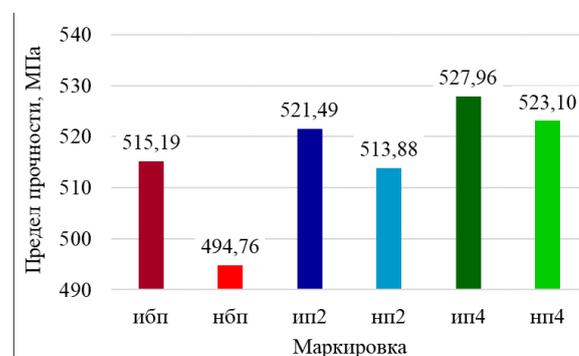


Рис. 5. Значения предела прочности для экспериментальных образцов
 Fig. 5. Tensile strength values for experimental samples

можно сделать вывод о наличии барьерного эффекта для покрытия на основе Cr, который обеспечивает защиту от воздействия водородной среды при рассмотренных условиях наводороживания.

С целью определения степени изменения прочностных свойств материала при наводороживании были проведены испытания на растяжение для каждого из исследуемых экспериментальных образцов. По результатам испытаний на растяжение были получены диаграммы деформации экспериментальных образцов, представленные на рис. 4.

В соответствии с представленными на рис. 4 диаграммами деформации можно отметить снижение прочностных свойств для экспериментального образца без покрытия, подвергнутого наводороживанию.

Относительное снижение значения деформации при разрыве для наводороженного экспериментального образца без барьерного покрытия по сравнению с исходным экспериментальным образцом составило 5,2 %, в то время как для образцов с покрытием толщиной ≈ 2 мкм это значение составило 3,6 %, а для экспериментальных образцов с покрытием толщиной ≈ 4 мкм – на 2,4 %. При этом, для экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной ≈ 2 мкм и ≈ 4 мкм, не подвергавшихся наводороживанию наблюдается увеличение абсолютных значений деформации при разрыве на 2 % и 7,7 % относительно исходного экспериментального образца без барьерного покрытия, соответственно.

Распределение значений предела прочности для экспериментальных образцов представлено на рис. 5.

Согласно полученным результатам снижение предела прочности для исходного образца без защитного покрытия относительно значений исходного образца составило 3,97 %, в то время как для наводороженного экспериментального образца с покрытием толщиной ≈ 2 мкм снижение относительно исходного экспериментального образца с барьерным покрытием толщиной ≈ 2 мкм составило 1,46 %, а для наводороженного экспериментального образца с покрытием толщиной ≈ 4 мкм отмечено аналогичное снижение предела прочности менее, чем на 1 %.

Таким образом, двукратное увеличение толщины покрытия обеспечило стабильность прочностных характеристик при исследуемых параметрах наводороживания.

Заключение

В рамках работы проведены металлографические исследования характеристик барьерного покрытия и приповерхностного слоя экспериментальных образцов из стали Ст20 и их изменений, вызванных воздействием водорода. В соответствии с проведенными результатами сделан вывод о наличии барьерного эффекта у покрытий на основе Сг толщиной ≈ 2 мкм и ≈ 4 мкм, обеспечивающего неизменность структуры и морфологии покрытия, а также приповерхностной области материала при испытаниях на растяжение. Выявлено увеличение приповерхностной микротвердости у экспериментальных образцов с барьерным покрытием, вызванное термической обработкой в процессе нанесения покрытия.

По результатам испытаний на растяжение отмечено снижение значения деформации при разрыве для наводороженного образца с покрытием толщиной ≈ 2 мкм по сравнению с исходным образцом с покрытием толщиной ≈ 2 мкм на 3,6 %, в то время как для наводороженного образца без барьерного покрытия снижение относительно контрольного образца составило 5,2 %. Для наводороженного образца с покрытием толщиной ≈ 4 мкм отмечено снижение значения деформации на 2,4 % по сравнению с исходным образцом с покрытием толщиной ≈ 4 мкм. При этом, стоит учитывать, что исходные значения деформации при разрыве для не подвергавшихся наводороживанию образцов с покрытием толщиной ≈ 2 мкм и ≈ 4 мкм превосходят данные значения для контрольного образца на 2 % и 7,7 %, соответственно.

Таким образом, выявлено снижение интенсивности воздействия водорода на пластичность материала более чем в 2 раза для экспериментального образца с барьерным покрытием толщиной ≈ 4 мкм.

Схожую картину демонстрируют полученные значения предела прочности. Снижение предела прочности для наводороженного образца без барьерного покрытия относительно контрольного образца составило 3,97 %, в то время как снижение для наводороженного образца с покрытием толщиной ≈ 2 мкм относительно исходного образца с покрытием толщиной ≈ 2 мкм и снижение для наводороженного образца с покрытием толщиной ≈ 4 мкм относительно исходного образца с покрытием толщиной ≈ 4 мкм составили 1,46 % и менее 1 % соответственно.

Увеличение толщины барьерного покрытия не только положительно влияет на сопротивляемость материала наводороживанию, но также повышает износостойкость покрытия, при условии, что не будет превышен предел толщины при котором начинает снижаться адгезия. Однако, целесообразность увеличения толщины барьерного покрытия должна оцениваться с технико-экономической точки зрения с учетом предполагаемого срока эксплуатации элемента, находящегося в контакте с водородсодержащей средой и параметров данной среды, так как для покрытий большей толщины требуется повышение продолжительности процесса нанесения, что влечет дополнительные затраты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhang L., Jia C., Bai F., Wang W., An S., Zhao K., Li Z., Li J., Sun H.** A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies // *Fuel*, Vol. 355, 2024. P. 129455.
- [2] **Oshiro K., Fujimori S.** Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals // *Applied Energy*, Vol. 313, 2022. P. 118803.
- [3] **Gong P., Turk A., Nutter J., Yu F., Wynne B., del-Castillo P.R.D., Rainforth W.M.** Hydrogen embrittlement mechanisms in advanced high strength steel // *Acta Materialia*, Vol. 223, 2022. P. 117488.
- [4] **Okonkwo P.C., Barhoumi E.M., Belgacem I.B., Mansir I.B., Aliyu M., Emori W., Uzoma P.C., Beitelmal W.H., Akyüz E., Radwan A.B., Shakoор R.A.** A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 12935–12948.
- [5] **Mao L.Y., Luo Z.A., Huang C., Zhang X.M.** Hydrogen embrittlement behavior in interstitial Mn–N austenitic stainless steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 36716–36732.
- [6] **Rodoni E., Verbeken K., Depover T., Iannuzzi M.** Effect of microstructure on the hydrogen embrittlement, diffusion, and uptake of dual-phase low alloy steels with varying ferrite-martensite ratios // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, 2024. pp. 53–65.
- [7] **Huang S., Hui H., Peng J.** Prediction of hydrogen-assisted fracture under coexistence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 36987–37000.
- [8] **Wetegrove M., Duarte M.J., Taube K., Rohloff M., Gopalan H., Scheu C., Dehm G., Kruth A.** Preventing Hydrogen Embrittlement: The Role of Barrier Coatings for the Hydrogen Economy // *Hydrogen*, Vol. 4, 2023. pp. 307–322.
- [9] **Laadel N.E., Mansori M.E., Kang N., Marlin S., Boussant-Roux Y.** Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals – A review on mechanisms, materials suitability and efficiency // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 32707–32731.
- [10] **Liang S., Huang M., Zhao L., Zhu Y., Li Z.** Effect of multiple hydrogen embrittlement mechanisms on crack propagation behavior of FCC metals: Competition vs. synergy // *International Journal of Plasticity*, Vol. 143, 2021. P. 103023.
- [11] **Jia G., Lei M., Li M., Xu W., Li R., Lu Y., Cai M.** Hydrogen embrittlement in hydrogen-blended natural gas transportation systems: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 32137–32157.
- [12] **Álvarez G., Harris Z., Wada K., Rodríguez C., Martínez-Pañeda E.** Hydrogen embrittlement susceptibility of additively manufactured 316L stainless steel: Influence of post-processing, printing direction, temperature and pre-straining // *Additive Manufacturing*, Vol. 78, 2023. P. 103834.
- [13] **Barrera O., Bombac D., Chen Y., Daff T.D., Galindo-Nava E., Gong P., Haley D., Horton R., Katarov I., Kermode J.R., Liverani C., Stopher M., Sweeney F.** Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum // *Journal of Materials Science*, Vol. 53, 2018. pp. 6251–6290.
- [14] **Kumar R., Arora A., Mahajan D.K.** Hydrogen-assisted intergranular fatigue crack initiation in metals: Role of grain boundaries and triple junctions // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 16481–16500.
- [15] **Fukunaga A.** Effect of high-pressure hydrogen environment in elastic and plastic deformation regions on slow strain rate tensile tests for iron-based superalloy A286 // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 18116–18128.
- [16] **Xi X., Liu Z., Qin Z., Wu T., Wang J., Xu N., Chen L.** Enhancement of the resistance to hydrogen embrittlement by tailoring grain boundary characteristics in a low carbon high strength steel // *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 27, 2023. pp. 7119–7127.
- [17] **Shehata M.F., El-Shamy A.M.** Hydrogen-based failure in oil and gas pipelines a review // *Gas Science and Engineering*, Vol. 115, 2023. P. 204994.

- [18] Duminica F.D., Eynde X.V., Mandy M., Nabi B., Georges C., Sturel T., Drillet P., Grigorieva R. Investigation of PVD thin films as hydrogen barriers in aluminized press hardened steels (PHS) // Surface and Coatings Technology, Vol. 397, 2020. P. 125940.
- [19] Fite S., Zukerman I., Shabat A.B., Barzilai S. Hydrogen protection using CrN coatings: Experimental and theoretical study // Surfaces and Interfaces, Vol. 37, 2023. P. 102629.
- [20] Ke N., Huang H., Wang F., Dong B., Huang A., Hao L., Xu X. Study on the hydrogen barrier performance of the SiOC coating // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, 2023. pp. 8286–8295.
- [21] Luo Z.A., Mao L.Y., Huang C., Zhou H.Y., Wang M.K. A strategy for simultaneously enhancing mechanical strength and hydrogen embrittlement resistance: Exceptional performance of laminated metal composite in hydrogen environments // Materials & Design, Vol. 237, 2024. P. 112549.
- [22] Tamura M., Takizawa H. TiAlN/TiMoN Coatings as Hydrogen Barriers // Journal of Materials Science and Engineering A, Vol. 9, February 2019.
- [23] Дасаев М.Р., Соколов И.С., Рыженков А.В., Григорьев С.В., Атауллин М.Р., Романов И.А. Исследование применения PVD-покрытия на основе Cr с целью защиты от водородного охрупчивания сталей // Глобальная энергия. 2024. Т. 29, № 4. С. 107–119. DOI: 10.18721/JEST.29407

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДАСАЕВ Марат Равилевич – ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», канд. техн. наук.

E-mail: DasayevMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-8264>

СОКОЛОВ Иван Сергеевич – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», без степени.

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1829-656X>

РЫЖЕНКОВ Олег Вячеславович – ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», канд. техн. наук.

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6434-6148>

ГРИГОРЬЕВ Сергей Владимирович – ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», канд. техн. наук.

E-mail: GrigoryevSVI@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-1405>

ЛИХАЕВА Алена Юрьевна – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», без степени.

E-mail: LikhayevaAY@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4920-7040>

АТАУЛЛИН Марат Ринатович – техник I категории, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», без степени.

E-mail: AtaullinMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2753-6249>

REFERENCES

- [1] **Zhang L., C. Jia, F. Bai, W. Wang, S. An, K. Zhao, Z. Li, J. Li, H. Sun**, A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies // *Fuel*, Vol. 355, 2024. P. 129455.
- [2] **K. Oshiro, S. Fujimori**, Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals // *Applied Energy*, Vol. 313, 2022. P. 118803.
- [3] **P. Gong, A. Turk, J. Nutter, F. Yu, B. Wynne, P.R.D. del-Castillo, W.M. Rainforth**, Hydrogen embrittlement mechanisms in advanced high strength steel // *Acta Materialia*, Vol. 223, 2022. P. 117488.
- [4] **P.C. Okonkwo, E.M. Barhouni, I.B. Belgacem, I.B. Mansir, M. Aliyu, W. Emori, P.C. Uzoma, W.H. Beitelmal, E. Akyüz, A.B. Radwan, R.A. Shakoob**, A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 12935–12948.
- [5] **L.Y. Mao, Z.A. Luo, C. Huang, X.M. Zhang**, Hydrogen embrittlement behavior in interstitial Mn–N austenitic stainless steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 36716–36732.
- [6] **E. Rodoni, K. Verbeke, T. Depover, M. Iannuzzi**, Effect of microstructure on the hydrogen embrittlement, diffusion, and uptake of dual-phase low alloy steels with varying ferrite-martensite ratios // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, 2024. pp. 53–65.
- [7] **S. Huang, H. Hui, J. Peng**, Prediction of hydrogen-assisted fracture under coexistence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 36987–37000.
- [8] **M. Wetegrove, M.J. Duarte, K. Taube, M. Rohloff, H. Gopalan, C. Scheu, G. Dehm, A. Kruth**, Preventing Hydrogen Embrittlement: The Role of Barrier Coatings for the Hydrogen Economy // *Hydrogen*, Vol. 4, 2023. pp. 307–322.
- [9] **N.E. Laadel, M.E. Mansori, N. Kang, S. Marlin, Y. Boussant-Roux**, Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals – A review on mechanisms, materials suitability and efficiency // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 32707–32731.
- [10] **S. Liang, M. Huang, L. Zhao, Y. Zhu, Z. Li**, Effect of multiple hydrogen embrittlement mechanisms on crack propagation behavior of FCC metals: Competition vs. synergy // *International Journal of Plasticity*, Vol. 143, 2021. P. 103023.
- [11] **G. Jia, M. Lei, M. Li, W. Xu, R. Li, Y. Lu, M. Cai**, Hydrogen embrittlement in hydrogen-blended natural gas transportation systems: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 32137–32157.
- [12] **G. Álvarez, Z. Harris, K. Wada, C. Rodríguez, E. Martínez-Pañeda**, Hydrogen embrittlement susceptibility of additively manufactured 316L stainless steel: Influence of post-processing, printing direction, temperature and pre-straining // *Additive Manufacturing*, Vol. 78, 2023. P. 103834.
- [13] **O. Barrera, D. Bombac, Y. Chen, T.D. Daff, E. Galindo-Nava, P. Gong, D. Haley, R. Horton, I. Katarov, J.R. Kermode, C. Liverani, M. Stopher, F. Sweeney**, Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum // *Journal of Materials Science*, Vol. 53, 2018. pp. 6251–6290.
- [14] **R. Kumar, A. Arora, D.K. Mahajan**, Hydrogen-assisted intergranular fatigue crack initiation in metals: Role of grain boundaries and triple junctions // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 16481–16500.
- [15] **A. Fukunaga**, Effect of high-pressure hydrogen environment in elastic and plastic deformation regions on slow strain rate tensile tests for iron-based superalloy A286 // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 18116–18128.
- [16] **X. Xi, Z. Liu, Z. Qin, T. Wu, J. Wang, N. Xu, L. Chen**, Enhancement of the resistance to hydrogen embrittlement by tailoring grain boundary characteristics in a low carbon high strength steel // *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 27, 2023. pp. 7119–7127.
- [17] **M.F. Shehata, A.M. El-Shamy**, Hydrogen-based failure in oil and gas pipelines a review // *Gas Science and Engineering*, Vol. 115, 2023. P. 204994.

- [18] F.D. Duminica, X.V. Eynde, M. Mandy, B. Nabi, C. Georges, T. Sturel, P. Drillet, R. Grigorieva, Investigation of PVD thin films as hydrogen barriers in aluminized press hardened steels (PHS) // Surface and Coatings Technology, Vol. 397, 2020. P. 125940.
- [19] S. Fite, I. Zukerman, A.B. Shabat, S. Barzilai, Hydrogen protection using CrN coatings: Experimental and theoretical study // Surfaces and Interfaces, Vol. 37, 2023. P. 102629.
- [20] N. Ke, H. Huang, F. Wang, B. Dong, A. Huang, L. Hao, X. Xu, Study on the hydrogen barrier performance of the SiOC coating // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, 2023. pp. 8286–8295.
- [21] Z.A. Luo, L.Y. Mao, C. Huang, H.Y. Zhou, M.K. Wang, A strategy for simultaneously enhancing mechanical strength and hydrogen embrittlement resistance: Exceptional performance of laminated metal composite in hydrogen environments // Materials & Design, Vol. 237, 2024. P. 112549.
- [22] M. Tamura, H. Takizawa, TiAlN/TiMoN Coatings as Hydrogen Barriers // Journal of Materials Science and Engineering A, Vol. 9, February 2019.
- [23] M.R. Dasayev, I.S. Sokolov, A.V. Ryzhenkov, S.V. Grigoryev, M.R. Ataulin, I.A. Romanov, Issledovaniye primeneniya PVD-pokrytiya na osnove Cr s tselyu zashchity ot vodorodnogo okhrupchivaniya staley // Globalnaya energiya. 2024. T. 29, № 4. S. 107–119. DOI: 10.18721/JEST.29407

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Marat R. DASAEV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: DasayevMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-8264>

Ivan S. SOKOLOV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1829-656X>

Oleg V. RYZHENKOV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6434-6148>

Sergey V. GRIGORYEV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: GrigoryevSVI@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-1405>

Alena Y. LIKHAeva – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: LikhayevaAY@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4920-7040>

Marat R. ATAULLIN – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: AtaulinMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2753-6249>

Поступила: 26.02.2024; Одобрена: 25.03.2024; Принята: 25.03.2024.

Submitted: 26.02.2024; Approved: 25.03.2024; Accepted: 25.03.2024.