*ЖУРНАЛ ПРИКЛАДНОЙ ХИМИИ /*
*RUSSIAN JOURNAL OF APPLIED CHEMISTRY. 2026, т. 99, № 1, с. 5–19*

ИСТОРИЯ, ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТИКА В ОБЛАСТИ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ВОДОРОДНЫЕ ПРОГРАММЫ

*УДК 338.45:661.96*
**DOI:** 10.7868/S3034554526010014

Обзор

# Тенденциии развития водородной энергетики в России и в мире. Технологии госкорпорации «РОСАТОМ» — основа будущих проектов

**К. А. Джусь[1], С. Е. Сафонов[1,2], В. А. Карасевич[2], В. Л. Константинов[1,2,3]**

[1] *Частное учреждение по обеспечению научного развития атомной отрасли «Наука и инновации», 119017, Российская Федерация, г. Москва, ул. Б. Ордынка, д. 24, эт. 8, каб. 820*
[2] *ООО «Лидер Консорциума «МЦИ МБИР», 115035, Российская Федерация, г. Москва, Ул. Б. Ордынка, д. 8/1, стр. 6*
[3] *Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 119017, Российская Федерация, г. Москва, ул. Б. Ордынка, д. 24*
*E-mail: KADzhus@rosatom.ru*

*Аннотация.* В статье представлен комплексный анализ современного состояния и перспектив развития водородной энергетики в мировом и российском контексте. На основе актуальных данных Международного энергетического агентства (2025) выявлен парадокс отрасли: одновременное снижение глобальных прогнозов по производству низкоуглеродного водорода к 2030 году с 49 до 37 млн тонн и рост инвестиционной активности (свыше 110 млрд долларов США). Детально проанализированы технологические аспекты производства водорода, инфраструктурные ограничения и региональные диспропорции с выделением лидирующей роли Китая и стран Юго-Восточной Азии. Особое внимание уделено стратегическим направлениям развития водородной энергетики в Российской Федерации, включая анализ мер государственной поддержки, институциональных изменений и научно-технических разработок. На примере Госкорпорации «Росатом» рассмотрены ключевые технологические направления: производство водорода различными методами, технологии его хранения, транспортировки и потребления. Сформулированы приоритеты дальнейшего развития, включая необходимость актуализации нормативно-правовой базы и укрепления механизмов государственно-частного партнерства.*

*Ключевые слова:* водородная энергетика; низкоуглеродный водород; технологическое развитие; Госкорпорация «Росатом»; нормативное регулирование; водородная безопасность

*Финансирование.* 1. Исследование проведено без дополнительного финансирования. 2. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

*Конфликт интересов.* Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

*Вклад авторов.* Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: К. А. Джусь — разработка концепции, сбор данных, написание текста рукописи; С. Е. Сафонов и В. А. Карасевич — анализ/интерпритация данных, редактирование; В. Л. Константинов — критический пересмотр рукописи, финальное одобрение статьи.

*Ссылка для цитирования. Джусь К. А., Сафонов С. Е., Карасевич В. А., Константинов В. Л.* Тенденциии развития водородной энергетики в России и в мире. Технологии госкорпорации «РОСАТОМ» — основа будущих проектов // Журнал прикладной химии / Russian Journal of Applied Chemistry. 2026. Т. 99. № 1. С. 5–19. http://doi.org/10.7868/S3034554526010014

* АЭТС — атомная энерготехнологическая станция, ВИЭ — возобновляемые источники энергии, ВТГР — высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, ЕТП — Евразийская технологическая платформа, МЭА — Международное энергетическое агентство, СТ-ТОТЭ — среднетемпературный твердооксидный топливный элемент, ХТЧ — химико-технологическая часть.

*ZHURNAL PRIKLADNOY KHIMII /*
*RUSSIAN JOURNAL OF APPLIED CHEMISTRY. 2026, vol. 99, No. 1, p. 5–19*

**HISTORY, STATE POLICY IN THE FIELD OF HYDROGEN ENERGY, HYDROGEN PROGRAMS**

**DOI:** 10.7868/S3034554526010014 Review

# Development Trends of Hydrogen Energy in Russia and Globally. ROSATOM Technologies — the Basis for Future Projects

**K. A. Dzhus[1], S. E. Safonov[1,2], V. A. Karasevich[2], V. L. Konstantinov[1,2,3]**

*[1] Science and Innovations — Nuclear Industry Scientific Development, Private Interprise, 119017, Russian Federation, Moscow, Bolshaya Ordynka St., 24, Floor 8, Room 820*
*[2] Consortium Leader of MBIR Reactor International Research Centre, Limited Liability Company, 15035, Russian Federation, Moscow, Bolshaya Ordynka St., 8/11, Bld. 6*
*[3] Rosatom State Atomic Energy Corporation, 119017, Russian Federation, Moscow, Bolshaya Ordynka St., 24*
*E-mail: KADzhus@rosatom.ru*

*Abstract.* This article presents a comprehensive analysis of the current state and future trajectory of the hydrogen energy sector, examining both global trends and the specific context of Russia. Drawing on the most recent data from the International Energy Agency (2025), the study identifies a central paradox: while global forecasts for low-carbon hydrogen production by 2030 have been revised downward from 49 to 37 million tons, there has been a concurrent surge in investment activity, exceeding USD 110 billion. The analysis provides a detailed examination of technological aspects of hydrogen production, existing infrastructure constraints, and significant regional disparities, spotlighting the leading role of China and Southeast Asian nations. A dedicated section focuses on the strategic development of hydrogen energy within the Russian Federation, assessing government support measures, institutional reforms, and advancements in research and development. Using the Rosatom State Atomic Energy Corporation as a primary case study, the article explores key technological pillars, including diverse hydrogen production methods, as well as cutting-edge solutions for its storage, transportation, and utilization. The paper concludes by outlining critical priorities for further development, emphasizing the urgent need to modernize the regulatory framework and enhance mechanisms for public-private partnership.*

*Keywords:* hydrogen energy; low-carbon hydrogen; technological development; Rosatom State Atomic Energy Corporation; policy framework; hydrogen safety

*Funding.* 1. The study was carried out without additional funding. 2. No additional grants have been received to conduct or direct this particular study.

*Conflict of interests.* The authors declare that they have no conflict of interest requiring disclosure in the article.

*Authors contribution.* All the authors confirm that their authorship meets the ICMJE criteria. The largest contributions were distributed as follows: K. A. Dzhus — concept development, data collection, writing of the manuscript text; S. E. Safonov and V. A. Karasevich — data analysis/interpretation, editing; V. L. Konstantinov — critical revision of the manuscript, final approval of the article.

*For citation.* Dzhus K. A., Safonov S. E., Karasevich V. A., Konstantinov V. L. Development trends of hydrogen energy in Russia and globally. ROSATOM technologies — the basis for future projects. *Zhurnal prikladnoy khimii / Russian Journal of Applied Chemistry.* 2026. V. 99. No. 1. P. 5–19. http://doi.org/10.7868/S3034554526010014



* NPPP — nuclear power and process plant, RES — renewable energy sources, HTGR — high-temperature gas-cooled reactor, ETP — Eurasian technology platform, IEA — International Energy Agency, IT-SOFC — intermediate temperature solid oxide fuel cell, CPP — chemical processing plant.

Эффективно решать задачи обеспечения технологического суверенитета и экономического можно только в условиях развития производственной и научно-технологической кооперации, взаимодействия всех заинтересованных сторон, например, на основе объединения потенциалов государств — членов ЕАЭС для стимулирования взаимовыгодного инновационного развития национальных промышленных комплексов, создания перспективных коммерческих технологий, высокотехнологичной, инновационной и конкурентоспособной продукции государств — членов ЕАЭС.

Дальнейший прогресс будет определяться эффективностью решения ряда фундаментальных задач: формирования долгосрочного спроса через механизмы государственно-частного партнерства, гармонизации нормативно-технической базы с учетом международных стандартов, создания отраслевой системы обеспечения водородной безопасности и концентрации ресурсов на прорывных НИОКР. Успешная реализация этих мер позволит будущим участникам формирующегося рынка не только обеспечить технологическую независимость в данной высокотехнологичной сфере, но и занять конкурентоспособные позиции на глобальном рынке водородных технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Global Hydrogen Review 2025. International Energy Agency (IEA). Paris, 2025. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025
2. Hydrogen Insights 2025: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Hydrogen Council. Brussels, 2025. https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2025/
3. The Future of hydrogen: Tracking the transition to a low-carbon gas world. Cedigaz. Rueil-Malmaison, 2024.
4. Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolysers to meet the 1.5°C climate goal. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2025.
5. Analysis of the potential for green hydrogen and related commodities trade. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2025. https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Analysis-of-the-potential-for-green-hydrogen-and-related-commodities-trade
6. Hydrogen storage and transportation market size, share, competitive landscape and trend analysis report. Allied Market Research. 2025. https://www.alliedmarketresearch.com/hydrogen-storage-and-transportation-market
7. Hydrogen storage for transport market report. MarketResearch.Biz. 2025. https://marketresearch.biz/report/hydrogen-storage-for-transport-market/
8. Commission approves €3.2 billion in state aid for hydrogen infrastructure project [Press release]. European Commission. 2024. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1234
9. Hydrogen economy outlook in Southeast Asia. ASEAN Centre for Energy. Jakarta, 2025.
10. Ученые Росатома создали уникальный испытательный стенд для отработки технологии получения низкоуглеродного водорода из природного газа // АО «Концерн Росэнергоатом». https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/news/47354/ (дата обращения: 16.11.2025).
11. НПО «Луч», ЦКБМ и СПбПУ создали в Протвино уникальный испытательный стенд для отработки технологии получения водорода из природного газа // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0». https://www.atomic-energy.ru/news/2024/10/31/150863 (дата обращения: 16.11.2025).
12. «Росатом» разработал электролизеры для производства водорода // Газета «Страна РОСАТОМ». https://strana-rosatom.ru/2022/02/17/rosatom-razrabotal-elektroliznyh/ (дата обращения: 16.11.2025).
13. Главгосэкспертиза России одобрила проект строительства стендового испытательного комплекса на Кольской АЭС // АО «Концерн Росэнергоатом». https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/news/47913/?sphrase_id=158520 (дата обращения: 16.11.2025).
14. Росатом» разработал новую электролизную установку для производства водорода // Газета «Страна РОСАТОМ». https://strana-rosatom.ru/2023/05/28/rosatom-razrabotal-novuju-elektrol/ (дата обращения: 16.11.2025).
15. На острове Сахалин установлен и запущен инновационный электролизный модуль ЭМ-30 производства НПО «Центротех» // АО «Атом-ТОР». https://atomtor.ru/press-center/novosti/tor-novouralsk-elektrolizer-czentroteh-zapushhen-na-pervom-v-strane-vodorodnom-poligone/?sphrase_id=1307 (дата обращения: 16.11.2025).
16. *Санин В. В., Мельников С. А., Животворев М. В., Солнцева Е. Б.* Возможности металлургии сплавов в АО «Гиредмет»: от металлогидридов до конструкционных спецсплавов для водородных энерготехнологий // Водородные энерготехнологии с использованием металлогидридов: сб. тр. Науч. конф. с междунар. участием и третьей Молодежной школы. Черноголовка, 2024. С. 27–30. https://www.elibrary.ru/rcaqzz
17. *Somo T. R., Lototsky M. V., Yartys V. A. et al.* Hydrogen storage behaviours of high entropy alloys: A review // J. Energy Storage. 2023. N 73. P. 108969. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108969

18. *Fashu S., Lototskyy M. V., Davids M. W. et al.* A review on crucibles for induction melting of titanium alloys // Materials and Design. 2020. N 186. P. 108295. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108295
19. *Dunikov D. O., Blinov D. V.* Extraction of hydrogen from a lean mixture with methane by metal hydride // Int. J. Hydrogen Energy. 2020. N 45. P. 9914–9926. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.201
20. *Lototskyy M. V., Yartys V. A., Pollet B. G., Bowman Jr. R. C.* Metal hydride hydrogen compressors: A review // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. N 39. P. 5818–5851. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.158


## REFERENCES


1. Global Hydrogen Review 2025. International Energy Agency (IEA). Paris, 2025. https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025
2. Hydrogen Insights 2025: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. Hydrogen Council. Brussels, 2025. https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2025/
3. The Future of hydrogen: Tracking the transition to a low-carbon gas world. Cedigaz. Rueil-Malmaison, 2024.
4. Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolysers to meet the 1.5°C climate goal. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2025.
5. Analysis of the potential for green hydrogen and related commodities trade. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2025. https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Analysis-of-the-potential-for-green-hydrogen-and-related-commodities-trade
6. Hydrogen storage and transportation market size, share, competitive landscape and trend analysis report. Allied Market Research. 2025. https://www.alliedmarketresearch.com/hydrogen-storage-and-transportation-market
7. Hydrogen storage for transport market report. MarketResearch.Biz. 2025. https://marketresearch.biz/report/hydrogen-storage-for-transport-market/
8. Commission approves €3.2 billion in state aid for hydrogen infrastructure project [Press release]. European Commission. 2024. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_1234
9. Hydrogen economy outlook in Southeast Asia. ASEAN Centre for Energy. Jakarta, 2025.
10. Scientists from ROSATOM have created a unique test bench for developing technology to produce low-carbon hydrogen from natural gas. The official website of JSC «Concern Rosenergoatom». https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/news/47354/ (accessed: 16.11.2025) (in Russ.).
11. Luch scientific production association, central design bureau of machine building (TsKBM) and SPbPU have created a unique test bench in protvino for developing hydrogen production technology from natural gas. The website of Scientific and Business Portal «Atomic Energy 2.0». https://www.atomic-energy.ru/news/2024/10/31/150863 (accessed: 16.11.2025) (in Russ.).
12. ROSATOM has developed electrolyzers for hydrogen production. The website of Newspaper «Strana ROSATOM». https://strana-rosatom.ru/2022/02/17/rosatom-razrabotal-elektroliznyh/ (accessed: 16.11.2025) (in Russ.).
13. Russia's main state expert review board (Glavgosexpertiza) approved the construction project for a bench testing complex at the Kola Nuclear Power Plant. The official website of JSC «Concern Rosenergoatom». https://www.rosenergoatom.ru/zhurnalistam/news/47913/?sphrase_id=158520 (accessed: 16.11.2025) (in Russ.).
14. ROSATOM has developed a new electrolysis unit for hydrogen production. The website of Newspaper «Strana ROSATOM». https://strana-rosatom.ru/2023/05/28/rosatom-razrabotal-novuju-elektrol/ (accessed: 16.11.2025) (in Russ.).
15. An innovative EM-30 electrolysis module produced by Centrotech has been installed and launched on Sakhalin Island. The official website of JSC Atom-TOR. https://atomtor.ru/press-center/novosti/tor-novouralsk-elektrolizer-czentroteh-zapushhen-na-pervom-v-strane-vodorodnom-poligone/?sphrase_id=1307 (accessed: 16.11.2025) (in Russ.).
16. Sanin V. V., Melnikov S. A., Zhivotvortsev M. V., Solntseva E. B. Capabilities in alloy metallurgy at JSC «Giredmet»: From metal hydrides to special structural alloys for hydrogen energy technologies. *Proceedings of the Scientific Conference with International Participation and the Third Youth School: Hydrogen Power Technologies Utilizing Metal Hydrides*. 2024. P. 27–30 (In Russ.). https://www.elibrary.ru/rcaqzz
17. Somo T. R., Lototsky M. V., Yartys V. A. et al. Hydrogen storage behaviours of high entropy alloys: A review. *Journal of Energy Storage*. 2023. No. 73. P. 108969. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108969
18. Fashu S., Lototskyy M. V., Davids M. W. et al. A review on crucibles for induction melting of titanium alloys. *Materials and Design*. 2020. No. 186. P. 108295. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108295
19. Dunikov D. O., Blinov D. V. Extraction of hydrogen from a lean mixture with methane by metal hydride. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. No. 45. P. 9914–9926. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.201
20. Lototskyy M. V., Yartys V. A., Pollet B. G., Bowman Jr. R. C. Metal hydride hydrogen compressors: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. N 39. P. 5818–5851. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.158

## *Сведения об авторах*

*Джусь Кирилл Андреевич* — канд. техн. наук, руководитель направления, Проектный офис по развитию водородной энергетики, частное учреждение «Наука и инновации», Москва, Российская Федерация,
E-mail: KADzhus@rosatom.ru,
https://orcid.org/0000-0002-3576-3863

*Сафонов Евгений Сергеевич* — руководитель направления, Проектный офис по развитию водородной энергетики, частное учреждение «Наука и инновации», Москва, Российская Федерация,
E-mail: EvgSSafonov@rosatom.ru,
https://orcid.org/0009-0008-4445-7711

*Карасевич Владислав Александрович* — канд. техн. наук, руководитель комитета, ООО «Лидер Консорциума «МЦИ МБИР», Москва, Российская Федерация,
E-mail: VAKarasevich@rosatom.ru,
https://orcid.org/0000-0001-5911-4924

*Константинов Василий Леонардович* — директор по развитию и международному сотрудничеству, частное учреждение «Наука и инновации», генеральный директор, ООО «Лидер Консорциума «МЦИ МБИР», директор международных научно-технических проектов, Госкорпорация «Росатом», Москва, Российская Федерация,
E-mail: VasiLeoKonstantinov@rosatom.ru,
https://orcid.org/0009-0008-1505-9714

Поступила в редакцию 18.11.2025
После доработки 02.12.2025
Принята к публикации 02.12.2025

## *Author information*

*Kirill A. Dzhus* — PhD in Technical Sciences, Division Manager, Project Management Office for Hydrogen Energy Development, Science and Innovations — Nuclear Industry Scientific Development, Private Enterprise, Moscow, Russian Federation,
E-mail: KADzhus@rosatom.ru,
https://orcid.org/0000-0002-3576-3863

*Evgenii S. Safonov* — Division Manager, Project Management Office for Hydrogen Energy Development, Science and Innovations – Nuclear Industry Scientific Development, Private Enterprise / Advisor to the CEO, Consortium Leader of MBIR Reactor International Research Centre, Moscow, Russian Federation,
E-mail: EvgSSafonov@rosatom.ru,
https://orcid.org/0009-0008-4445-7711

*Vladislav A. Karasevich* — PhD in Technical Sciences, Head of the Committee, Consortium Leader of MBIR Reactor International Research Centre, Limited Liability Company, Moscow, Russian Federation,
E-mail: VAKarasevich@rosatom.ru,
https://orcid.org/0000-0001-5911-4924

*Vasily L. Konstantinov* — Director of Development and International Cooperation, Science and Innovations — Nuclear Industry Scientific Development, Private Enterprise, Director General, Consortium Leader of MBIR Reactor International Research Centre, Limited Liability Company, Director in International Science and Technology Projects, Rosatom State Atomic Energy Corporation, Moscow, Russian Federation,
E-mail: VasiLeoKonstantinov@rosatom.ru,
https://orcid.org/0009-0008-1505-9714

Received 18.11.2025
Revised 02.12.2025
Accepied 02.12.2025

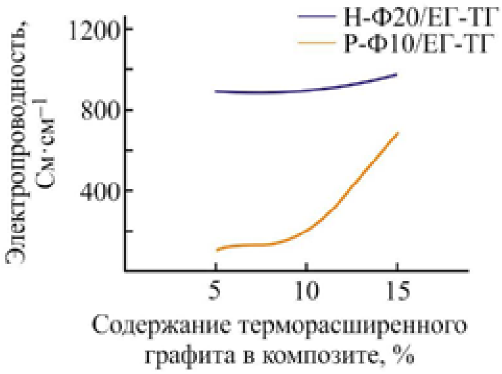


**Рис. 5.** Влияние добавления ТРГ к проводящему наполнителю композитного материала

**Fig. 5.** Effect of adding TEG to the conductive filler of a composite material

изгиб, показывающее аналогичный эффект как для Н-Ф20/ЕГ-МСУНТ, так и для Н-Ф20/ЕГ-ТРГ.

Добавление ТРГ к проводящему наполнителю также привело к значительному увеличению электропроводности — для композитного материала Н-Ф20/ЕГ-ТРГ при добавлении 15 мас% ТРГ к проводящему наполнителю электропроводность достигла почти 1000 См·см$^{-1}$ (рис. 5).

Однако добавление ТРГ отрицательно сказалось на прочности композитных материалов, максимальное значение которой составило 23 МПа для Р-Ф10/ЕГ-ТРГ, содержащего 15 мас% ТРГ, что было почти в 2 раза меньше, чем для Р-Ф10/ЕГ-МСУНТ, содержащего 2 мас% МСУНТ, с аналогичной электропроводностью.

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе была изучена возможность использования модифицированных фенольных смол для изготовления композитных биполярных пластин. Исследовано влияния состава модифицированного фенолформальдегидного полимерного связующего на проводимость и физико-механические свойства композитов на основе графита. Показано, что композитные БП, полученные на основе естественного графита и модифицированной фенолформальдегидной смолы новолачного и резольного типа, характеризуются высокими электропроводностью (более 100 См·см$^{-1}$) и прочностными свойствами (более 30 МПа). Исследовано влияние модификации фенолформальдегидного полимера путем ввода в его структуру фенолфталеина в качестве сомономера на термическую стабильность полимеров. Отмечено увеличение термостойкости фенолформальдегидных полимеров на основе резольных и новолачных смол при их модификации фенолфталеином. Показано, что фенолформальдегидные полимеры на основе резольных смол обладают большей термической стабильностью по сравнению с полимерами на основе новолачных смол. Это может быть объяснено наличием простоэфирных мостиков сшивки, которые обладают большей термической стабильностью по сравнению с метиленовыми мостиками. Самой высокой термостойкостью обладают полимеры с содержанием 5 мас% фенолфталеина. Исследовано влияния содержания связующего и природы наполнителя на физико-механические и электротехнические свойства композиционных материалов. Определен оптимальный состав композитного материала на основе резольной смолы, модифицированной 10 мас% фенолфталеина и токопроводящего наполнителя, содержащего естественный графит в сочетании с 2 мас% углеродных нанотрубок, обладающий прочностью на изгиб 46 МПа и электропроводностью 514 См·см$^{-1}$, что демонстрирует большой потенциал применения в качестве биполярных пластин для средне- и низкотемпературных водородных топливных элементов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES


1. Kahraman H., Akın Y. Recent studies on proton exchange membrane fuel cell components, review of the literature. *Energy Conversion and Management*. 2024. V. 304. P. 118244. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118244
2. Tang A., Crisci L., Bonville L. et al. An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2021. V. 13. No. 2. P. 022701. https://doi.org/10.1063/5.0031447
3. Wenkai L., Zhiyong X., Haodong Z. Current status of research on composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): Nanofillers and structure optimization. *RSC Advances*. 2024. V. 14. No. 10. P. 7172–7194. https://doi.org/10.1039/D3RA08054D
4. Pozio A., Zaza F., Masci A. et al. Bipolar plate materials for PEMFCs: A conductivity and stability study. *Journal of Power Sources*. 2008. V. 179. No. 2. P. 631-639. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.038
5. Sasikumar K., Manoj N. R., Mostafizur Rahaman T. M. et al. Mechanical properties of carbon-containing polymer composites. *Carbon-Containing Polymer Composites*. 2018. P. 125–157. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2688-2_4
6. Huang P., Chen Z., Zhang J. et al. Stainless steel bipolar plate fuel cell with different flow field structures prepared by laser additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. V. 183. P. 122186. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122186

7. Shi J., Zhang P., Han Y. et al. Investigation on electrochemical behavior and surface conductivity of titanium carbide modified Ti bipolar plate of PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. No. 16. P. 10050–10058. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.203
8. Wang H., Hou K., Lu C. et al. Investigation of electroplating trivalent Cr-C on copper alloy as bipolar plates with different current density in PEMFCS. *The Electrochemical Society*. 2015. No. 1. P. 154–154. https://doi.org/10.1149/MA2015-01/1/154
9. Bauer A., Härtel S., Awiszus B. Manufacturing of metallic bipolar plate channels by rolling. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2019. V. 3. No. 2. P. 48. https://doi.org/10.3390/jmmp3020048
10. Jeong K. I., Oh J., Song S. A. et al. A review of composite bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells: Electrical properties and gas permeability. *Composite Structures*. 2021. V. 262. P. 113617. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113617
11. Adloo A., Sadeghi M., Masoomi M. et al. High performance polymeric bipolar plate based on polypropylene/graphite/graphene/nano-carbon black composites for PEM fuel cells. *Renewable Energy*. 2016. V. 99. P. 867–874. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.062
12. Wang X., Qu Z. Yang, H. Zhang G. et al. Collective enhancements on thermal-electrical and mechanical properties of graphite-based composite bipolar plates through the coupled manipulations of molding and impregnation pressures. *Membranes*. 2022. V. 12. No. 2. P. 222. https://doi.org/10.3390/membranes12020222
13. Simaafrookhteh S., Taherian R., Shakeri M. Stochastic microstructure reconstruction of a binder/carbon fiber/expanded graphite carbon fiber paper for PEMFCs applications: Mass transport and conductivity properties. *Journal of the Electrochemical Society*. 2019. V. 166. No. 7. P. F3287. https://doi.org/10.1149/2.0331907jes
14. Kumar R., Kar K. K., Dasgupta K. Superior electrical, mechanical and viscoelastic properties of CNTs coated carbon textile reinforced phenolic composite for high-performance structural applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2021. V. 138. No. 10. P. 49968. https://doi.org/10.1002/app.49968
15. Pal R. Abhishek, Jha K., Akhtar M. J. et al. Enhanced microwave processing of epoxy nanocomposites using carbon black powders. *Advanced Powder Technology*. 2017. V. 28. No. 4. P. 1281–1290. https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.02.016
16. Radzuan N. A. M., Abu Bakar Sulong, Mahendra Rao Somalu et al. Fibre orientation effect on polypropylene/milled carbon fiber composites in the presence of carbon nanotubes or graphene as a secondary filler: Application on PEM fuel cell bipolar plate. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. V. 44. No. 58. P. 30618–30626. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.063
17. Mehta V., Cooper J. S. Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. *Journal of Power Sources*. 2003. V. 114. No. 1. P. 32–53. https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00542-6
18. Yadav A. K., Banerjee S., Kumar R. et al. Mechanical analysis of nickel particle-coated carbon fiber-reinforced epoxy composites for advanced structural applications. *ACS Applied Nano Materials*. 2018. V. 1. No. 8. P. 4332–4339. https://doi.org/10.1021/acsanm.8b01193
19. Kumar R., Varshney S., Kar K. K. et al. Fabrication and characterization of eco-friendly human-hair derived porous carbon-filled carbon fabric-reinforced polymer composites. *Polymer Composites*. 2019. V. 40. No. S2. P. E1573–E1587. https://doi.org/10.1002/pc.25078
20. Raunija T. S. K., Gautam R. K., Bhradwaj V. M. et al. Low cost and rapidly processed randomly oriented carbon/carbon composite bipolar plate for PEM fuel cell. *Fuel Cells*. 2016. V. 16. No. 6. P. 801–809. https://doi.org/10.1002/fuce.201600079
21. Simaafrookhteh S., Khorshidian M., Momenifar M. Fabrication of multi-filler thermoset-based composite bipolar plates for PEMFCs applications: Molding defects and properties characterizations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. No. 27. P. 14119–14132. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.105
22. Taherian R., Hadianfard M. J., Golikand A. N. Manufacture of a polymer-based carbon nanocomposite as bipolar plate of proton exchange membrane fuel cells. *Materials and Design*. 2013. V. 49. P. 242–251. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.01.058
23. Kakati B. K., Sathiyamoorthy D., Verma A. Electrochemical and mechanical behavior of carbon composite bipolar plate for fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. V. 35. No. 9. P. 4185–4194. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.033
24. Lee Y. K., Kim D. J., Kim H. J. et al. Activation energy and curing behavior of resol-and novolac-type phenolic resins by differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003. V. 89. No. 10. P. 2589-2596. https://doi.org/10.1002/app.12340
25. Mishra S., Verma V., Kishore V. et al. A review of polymeric bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells: Materials, fabrication, applications, cost analysis, and current status. *Energy & Environment*. 2024. V. 35. No. 8. P. 4408–4444. https://doi.org/10.1177/0958305X241259990