



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-7-14
EDN: GUXRGV

Научная статья / Research article

Визуализация процесса агломерации частиц меди, используемых при изготовлении токосъемных элементов литий-ионных аккумуляторов

Д.О. Митягин^{a,b}✉, А.А. Короннов^b, С.В. Агасиева^b

^a МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

^b Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

✉ Mityagin.danya@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 10 сентября 2025 г.

Доработана: 10 ноября 2025 г.

Принята к публикации: 15 ноября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Цель исследования — сравнительный анализ дисперсионных сред для синтеза и хранения наночастиц меди, получаемых из формиата меди, с последующей оценкой их пригодности для использования в токосъемниках. Посредством применения методов динамического светорассеяния, реологии и рефрактометрии изучены характеристики частиц в средах «этиловый спирт» и «спирт + этиленгликоль». Показано, что использование комбинированной среды позволяет получать частицы с меньшим средним размером (56,7 нм против 107,1 нм) и более узким распределением (83,4 % частиц в диапазоне 64–128 нм). Для визуализации данных построены гистограммы и аппроксимированы законы распределения (нормальное и Пирсона). Экспериментально установлено, что скорость агломерации частиц в среде «спирт + этиленгликоль» в 2 раза ниже, чем в чистом спирте. На основании результатов сделан вывод о целесообразности применения смеси спирта с этиленгликолем в качестве стабилизирующей среды для долговременного хранения медной нанодисперсии.

Ключевые слова: системы накопления энергии, токосъемники, нанодисперсия меди, динамическое светорассеяние, нормальное распределение, распределение Пирсона, регрессия

Вклад авторов

Митягин Д.О. — проведение эксперимента, обработка данных, работа с распределением, написание текста; Короннов А.А. — обработка данных, визуализация; Агасиева С.В. — обработка данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Митягин Д.О., Короннов А.А., Агасиева С.В. Визуализация процесса агломерации частиц меди, используемых при изготовлении токосъемных элементов литий-ионных аккумуляторов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 7–14. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-7-14>
EDN: GUXRGV

© Митягин Д.О., Короннов А.А., Агасиева С.В., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Visualization of the Agglomeration Process of Copper Particles Used in the Manufacture of Current-Carrying Cells of Lithium-Ion Batteries

Daniil O. Mityagin^{a,b}✉, Alexey A. Koronov^b, Svetlana V. Agasieva^b

^aMIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

^bRUDN University, Moscow, Russian Federation

✉ Mityagin.danya@gmail.com

Article history

Received: September 10, 2025

Revised: November 10, 2025

Accepted: November 15, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The present study aims to conduct a comparative analysis of dispersion media used for the synthesis and storage of copper nanoparticles derived from copper formate, and to evaluate their suitability for application in current collectors. Particle characteristics in two media, namely ethyl alcohol and a mixture of alcohol and ethylene glycol, were investigated using dynamic light scattering, rheological analysis, and refractometry. The results demonstrate that the combined solvent system produces nanoparticles with a smaller average diameter (56.7 nm compared to 107.1 nm in pure alcohol) and a narrower size distribution, with 83.4% of particles falling within the 64–128 nm range. To visualise the data, particle size histograms were constructed, and the distributions were approximated using normal and Pearson distribution models. Experimental findings further indicate that the rate of particle agglomeration in the alcohol — ethylene glycol medium is approximately two times lower than in pure alcohol. On the basis of these results, the alcohol — ethylene glycol mixture can be recommended as a stabilising dispersion medium for the long-term storage of copper nanodispersions intended for use in current collector applications.

Keywords: lithium-ion battery, current collectors, copper nanoparticle dispersion, agglomeration, dynamic light scattering, normal distribution, Pearson distribution

Authors' contribution

Mityagin D.O. — experiment conducting, data processing, working with distribution, writing; *Koronov A.A.* — data processing, visualization; *Agasieva S.V.* — data processing. All authors read and approved the final version of the article.

For citation:

Mityagin DO, Koronov AA, Agasieva SV. Visualization of the agglomeration process of copper particles used in the manufacture of current-carrying cells of lithium-ion batteries. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):7–14. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-7-14> EDN: GUXRGV

Введение

Высокие темпы развития промышленности требуют опережающего развития энергетики. Современные информационные технологии предполагают использование больших объемов электрической энергии. В целях разработки высокоэффективных энергетических устройств применяют самые современные методы [1; 2]. Однако наряду с высокой эффективностью необходимо обеспечивать и высокую надежность энергосистем и электрооборудования [3; 4]. Будущее использование доступных источников энергии во многом зависит от развития эффективных систем хранения энергии. В настоящее время существуют тради-

ционные способы хранения электроэнергии, полученной от стационарных электростанций, которые дополняются множеством различных новых технологий [5].

Для обеспечения мобильности индивидуального электротранспорта необходимо создание аккумуляторов, способных хранить достаточное количество энергии для длительных поездок [6]. Существующие на рынке решения пока можно рассматривать лишь как временные меры. С современной точки зрения, наиболее перспективным устройством для хранения электрической энергии является литий-ионный аккумулятор. Существует множество решений, обусловленных улучшением электрохимических свойств батареи, свя-

занных с изменением состава катодной массы. При этом гораздо меньшее внимание уделяется токосъемникам — элементам, которые формируют контакт с электрической сетью. Основные энергетические потери приходятся на процесс токосъема, что является актуальной проблемой при использовании накопителей энергии. Одним из возможных решений данной проблемы является применение высокодисперсной меди при изготовлении токосъемников. Медь обладает высокой электропроводностью, имеет стабильные показатели в широком диапазоне температур, а также является диамагнетиком, что позволяет избежать помех, вызываемых электромагнитными полями в процессе токосъема. При этом основные свойства наночастиц меди зависят от метода, которым они были получены. Главной проблемой при выборе метода является отсутствие представления о возможности получения частиц различных размеров при применении методов синтеза дисперсий. В работе предпринята попытка прогнозирования появления частиц определенных размеров, полученных методом синтеза нанодисперсии из формиата меди, а также визуализации агломерации данных частиц с течением времени при хранении данной нанодисперсии.

1. Цель и постановка задачи

Цель исследования — представление визуализации процессов получения частиц высокодисперсной меди из формиата меди и агломерации данных частиц, а также получить теоретическое распределение частиц различных размеров в различных средах. Представление необходимо для понимания возможности использования частиц, полученных данным методом, при изготовлении токосъемников литий-ионных аккумуляторов, основываясь на информации о размерах таких частиц. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1) синтезировать наночастицы меди из формиата меди в двух различных средах: «этиловый спирт» и «смесь этилового спирта с этиленгликолем»;

2) измерить и сравнить размеры полученных частиц и их распределение в обеих средах методом динамического светорассеяния;

3) провести визуализацию распределения частиц, построив гистограммы и подобрав теоретические модели распределения (нормальное и распределение Пирсона) для описания данных;

4) исследовать кинетику процесса агломерации (укрупнения) частиц меди в обеих средах в течение 24 часов;

5) на основе полученных данных оценить стабильность нанодисперсий и сделать вывод о перспективности каждой среды для практического применения.

2. Теоретический анализ

Основные проблемы токосъемников

Главными характеристиками, от которых зависит процесс токосъема, являются надежность, экономичность и энергоэффективность. Надежность токосъема предполагает отсутствие повреждений, возникающих на токосъемниках, а также в электрической сети, из-за чего происходит остановка работы устройства. С точки зрения экономичности можно рассматривать различные технологии изготовления токосъемников, в которых используются современные материалы. Применение новых материалов позволяет продлить срок работы устройства, а также уменьшить стоимость производства. Энергоэффективность процесса токосъема определяется параметрами самого токосъемника, среди которых можно выделить материал, из которого он изготовлен, а также контактную площадь поверхности.

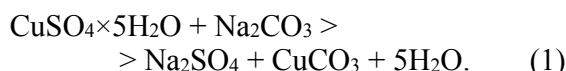
Основные потери в процессе токосъема приходятся именно на отсутствие полного контакта с электрической сетью. Это связано с процессом изготовления токоснимающего устройства. Во-первых, необходимо использовать материалы, обеспечивающие высокую электропроводность. Во-вторых, передача электроэнергии должна проходить равномерно по всей площади контакта. В связи с этим возникает необходимость использования дисперсных составов различных материалов [7; 8]. Малый размер частиц позволяет обеспечить высокую плотность соприкосновения, что приводит к уменьшению электрических потерь в процессе токосъема [8–10]. Отличительная особенность получения наночастиц меди состоит в том, что частицы размером до 200 нм могут быть получены практически из любых исходных солей меди. Данная особенность позволяет выбирать метод, отталкиваясь от стоимости исходных материалов, что приводит к значительной экономической выгоде всего технологического процесса. При этом возникает проблема хранения и транспортировки частиц меди ввиду агломерации частиц [11–13].

3. Экспериментальная часть

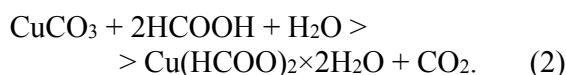
3.1. Способ получения

В рамках исследования для получения наночастиц меди нами используется формиат меди [14].

Для синтеза формиата меди одним из основных компонентов является карбонат меди. Получить его возможно, смешав раствор кристаллогидрата сульфата меди $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ и раствор карбоната натрия Na_2CO_3 . Подготовленные растворы объемом 50 мл смешиваются, а затем помещаются в ультразвуковую ванну. Реакция между данными компонентами выглядит следующим образом:



В результате получаем карбонат меди, сульфат натрия и воду. Для того чтобы отделить сульфат натрия от необходимого нам карбоната, необходимо отфильтровать полученные вещества. В качестве фильтра используется установка, состоящая из воронки Бюхнера. После процесса фильтрации к карбонату меди порционно добавляется концентрированная муравьиная кислота при тщательном перемешивании. Полученная смесь устанавливается в ультразвуковую ванну для лучшего смешивания компонентов. В результате реакции образуется формиат меди голубого цвета:



Полученный формиат добавляется в различные среды для того, чтобы избежать агломерации частиц. В данной работе в качестве среды будут использованы этиловый спирт, а также смесь этилового спирта и этиленгликоля.

3.2. Способ измерения размера частиц

Измерение размера частиц проводится методом динамического рассеяния с использованием спектрометра динамического светорассеяния ZetasizerNano ZS производства Malvern Instruments. Для определения вязкости растворителя применялся метод ротационной реометрии. Для измерения использовался реометр Kinexus Pro. Для измерения коэффициента преломления — рефрактометр ИРФ-454Б2М. Показатели растворителей приведены в таблице.

Показатели растворителей

Растворитель	Показатель преломления	Вязкость, МПа*с, при 25 °С
Спирт + этиленгликоль (безводный)	1,137	4,5
Спирт	1,360	1,096

Источники: выполнено Д.О. Митягиным, А.А. Коронновым.

4. Результаты и обсуждение

Полученный образец формиата меди добавляется в этиловый спирт. Формиат меди растворяется в этиловом спирте в соотношении 0,25 г/100 мл. Размеры частиц исследуются в данном растворе при температуре 15 °С. Измерение проводится методом динамического светорассеяния. Данный эксперимент повторяется не менее 5 раз для подтверждения размера частиц, а также для установления отсутствия агломерации между частицами в начале эксперимента. Результаты измерения показывают, что при получении частиц меди данным способом образуются преимущественно частицы размером 107,1 нм. При этом дисперсия не является стабильной, в ней присутствуют крупные частицы. Во втором эксперименте в качестве среды используется смесь спирта и этиленгликоля. После изменения среды размер частиц остается в том же диапазоне, но в течение повторного измерения размера частиц их агломерация не наблюдается. Размер частиц в данном случае преимущественно равен 56,7 нм, что позволяет использовать данные частицы в дальнейшем для изготовления токосъемников. Исходя из этого, можно сделать вывод, что данная среда является более подходящей для хранения в ней полученной нанодисперсии. Результаты измерения представлены на общем графике на рис. 1.

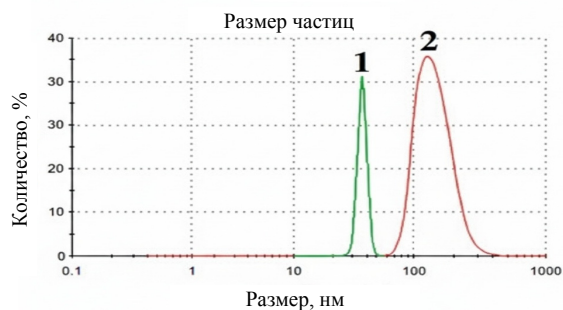


Рис. 1. Результаты измерения с помощью прибора Zetasizer для двух экспериментов :
1 — медь в среде «спирт + этиленгликоль»;
2 — медь в среде «спирт»

Источники: выполнено Д.О. Митягиным, А.А. Коронновым.

Визуализация распределения. Для наглядности проведем визуализацию результатов экспериментов [15; 16]. Обрабатываем данные, полученные на графиках, и выясним процентное соотношение частиц в общем количестве. Для этого возьмем 20 точек для каждого графика и посмотрим, какой процент от общего количества частиц составляют частицы полученного размера.

Построим гистограммы для двух сред и отобразим на них распределение в диапазонах частиц. Для этого в данной выборке разделим данные на интервалы группирования (рис. 2 и 3). Для спирта получаем шаг 80, для смеси спирта и этиленгликоля — 32. Построим гистограммы, сгруппировав

данные. Для данных гистограмм построим законы распределения величин и отразим, вероятность появления каких частиц наиболее возможна. Если отсечь набор значений после 300 нм, то можно сосредоточиться на центральной части гистограммы и увидеть выраженный пик. Исходя из этого, для меди, которая находится в спирте, можно воспользоваться Гауссовским распределением. Вместе с тем наличие пика вначале дает нам возможность использовать другую функцию распределения. Для обработки данных такого типа воспользуемся распределением Пирсона. Рассчитаем все необходимые элементы для функций и построим график, на котором изобразим их.

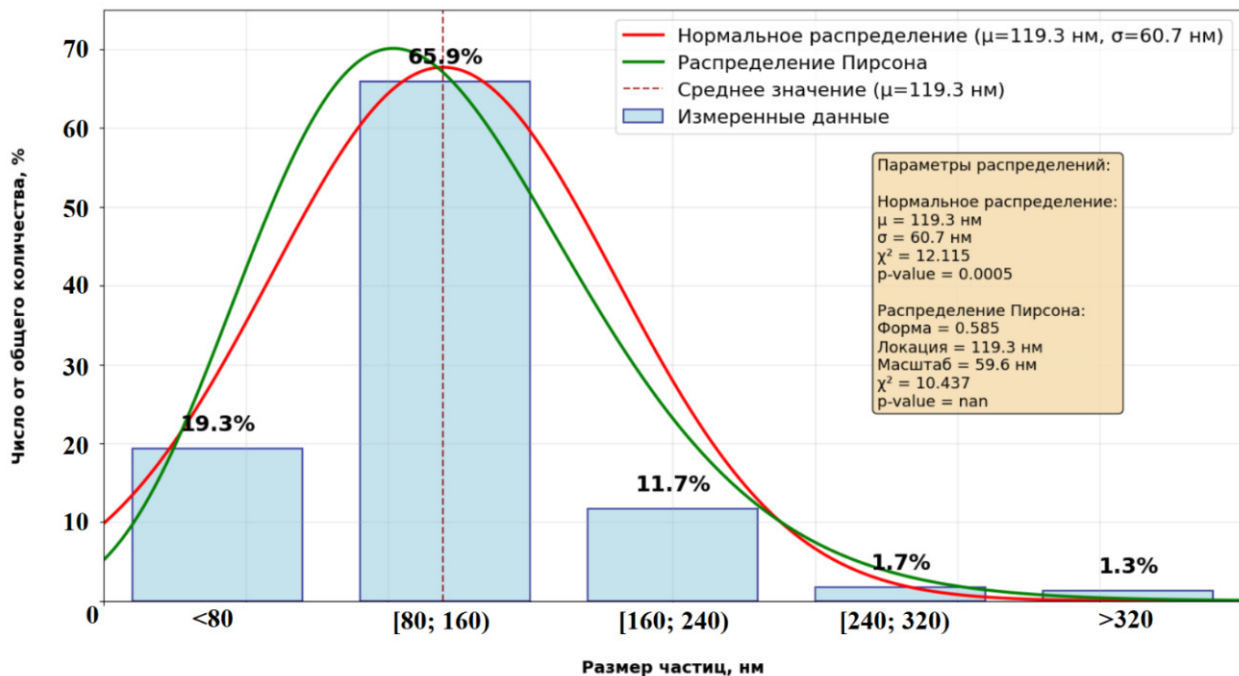


Рис. 2. Гауссовское распределение и распределение Пирсона для частиц, находящихся в спирте

Источники: выполнено Д.О. Митягиным, А.А. Коронновым.

На основе полученного распределения можно сделать вывод о том, что 65,9 % частиц находятся в диапазоне от 80 до 160 нм. При этом в дисперсии возможно образование более крупных частиц, что не дает нам возможность использовать ее в дальнейшем для изготовления токоъемников, поскольку применение крупных частиц при дальнейшем термическом разложении формиата меди приведет к малой площади соприкосновения, а следовательно, к наличию энергетических потерь в процессе токосяема.

При рассмотрении гистограммы в среде «Спирт + этиленгликоль» можно заметить образование пика вначале с дальнейшим спадом. Рассчитав все необходимые величины для этой функции, построим график распределения частиц в растворе.

На основании данного распределения можно сделать вывод о том, что большая часть частиц (83,4 %) находятся в диапазоне от 64 до 128 нм. При использовании данной среды получены частицы, которые в дальнейшем можно использо-

вать для изготовления токоъемников, но наличие больших частиц говорит о том, что все еще есть вероятность получения малой площади соприкосновения. В таком случае можно восполь-

зоваться предварительной фильтрацией данных частиц, но необходимо убедиться в том, что частицы в данной дисперсии остаются стабильными.

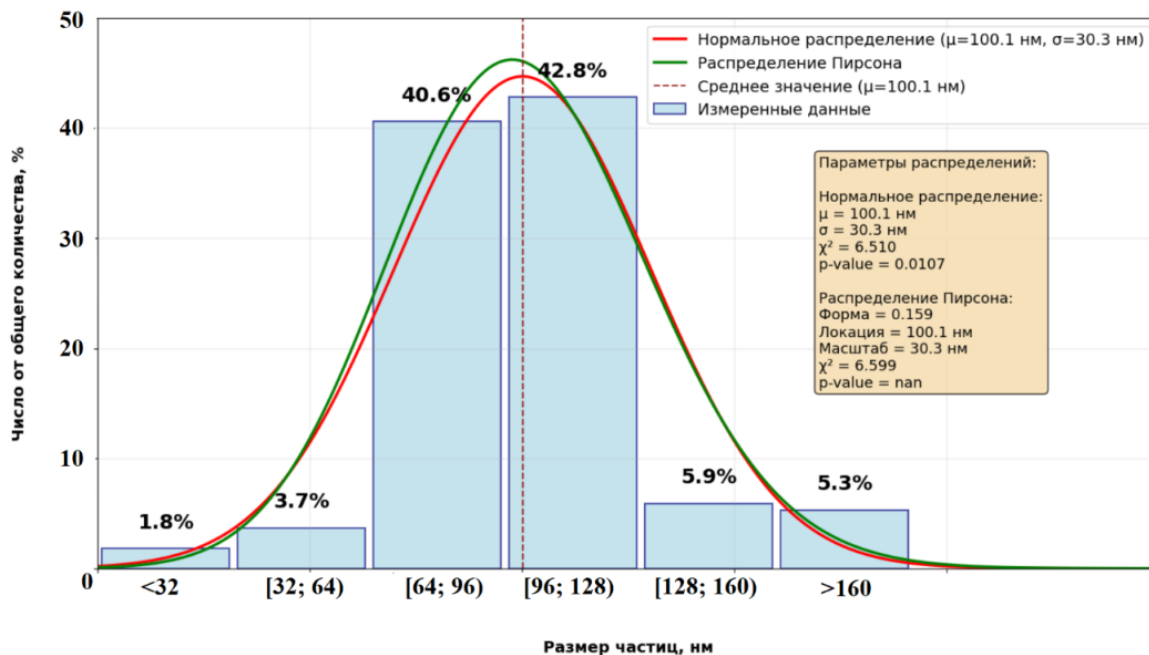


Рис. 3. Гауссовское распределение и распределение Пирсона для частиц, находящихся в смеси спирта и этиленгликоля

И с т о ч н и к: выполнено Д.О. Митягиным, А.А. Коронновым.

Спустя некоторое время после проведения эксперимента частицы меди начинают агломерировать. Измерения размеров частиц проводились в течение 1 дня каждые 4 часа. За это время частицы меди, находящиеся в среде «спирт», увеличились в размерах в 4,6 раза, в то время как

частицы меди в среде «спирт + этиленгликоль» — в 2,4 раза. На основе данных измерений можно сделать вывод о том, что для хранения нанодисперсий меди среда «спирт + этиленгликоль» является более выгодной, поскольку агломерация частиц в ней проходит медленнее (рис. 4).

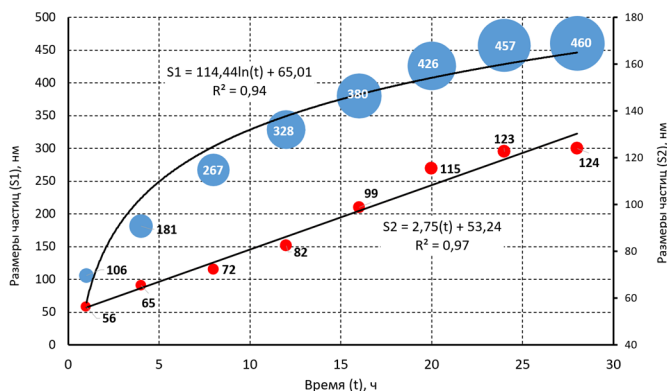


Рис. 4. Агломерация меди:

S1 — размер частиц в среде «спирт», S2 — размер частиц в среде «спирт + этиленгликоль»

И с т о ч н и к: выполнено Д.О. Митягиным, А.А. Коронновым.

Изобразим процесс агломерации частиц меди с течением времени в различных растворах.

На основе анализа данного графика можно сделать вывод о том, что наночастицы в среде «спирт» нестабильны. Следовательно, работа с данной нанодисперсией приводит к потерям части материала не только в процессе фильтрации, но и в процессе агломерации, поскольку использование крупных частиц даст гораздо худший результат при изготовлении токосъёмников. В случае с наночастицами в среде «спирт + этиленгликоль» агломерация идет медленнее, что позволяет получить желаемые параметры для процесса токосъема даже после длительного хранения нанодисперсии.

Заключение

В работе определены основные зависимости, позволяющие описать распределение частиц меди в средах «спирт» и «спирт + этиленгликоль», а также показан процесс агломерации частиц меди в течение 24 ч после проведения эксперимента. Построены гистограммы, описывающие количество частиц определенных размеров и их содержание в растворах. В среде «спирт» преимущественно образуются частицы размером ~107,1 нм, а в среде «спирт + этиленгликоль» — более мелкие частицы размером ~56,7 нм. Более стабильной средой является «спирт + этиленгликоль», так как распределение частиц в этой среде более узкое (83,4 % частиц в диапазоне 64–128 нм), в то время как в чистом спирте распределение шире (65,9 % частиц в диапазоне 80–160 нм) и присутствуют крупные частицы, непригодные для использования. На основе полученных данных сформулированы выводы об использовании различных сред для получения различных размеров частиц меди, а также для хранения нанодисперсии меди и ее дальнейшем применении.

Список литературы

1. Monakov Y., Tarasov A., Ivannikov A., Murzintsev A., Shutenko N. Optimization of equipment operation in power systems based on the use in the design of frequency-dependent models // *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 18. Article no. 6756. <https://doi.org/10.3390/en16186756> EDN: UFOGNT
2. Bulatov Y., Kryukov A., Suslov K. Innovative technologies for controlling modes of power supply systems using renewable energy sources // *Energy transition holistic impact challenge (ETHIC): A new environmental and climatic era. Environmental science and engineering /*

G.C. Lazaroiu, M. Roscia, V.S. Dancu (eds). Springer Publ.; 2024. p. 299–344. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55448-3_13

3. Калиберда И.В. О нормативно-правовом обеспечении электробезопасности на объектах электроэнергетики и энергопринимающих установках // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 7. С. 26–31. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-7-26-31> EDN: AQFOSC

4. Trofimov V.B., Temkin I.O., Solodov S.V. Application of case-based reasoning in hazard evaluation in complex process flow control // *Eurasian Mining*. 2023. Vol. 40. No. 2. P. 41–46. <http://doi.org/10.17580/em.2023.02.09> EDN: GWVUIJ

5. Филина О.А. Анализ электробезопасности в электрических сетях промышленных предприятий // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 6. С. 78–84. <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-78-84> EDN: RHDUWH

6. Khekert E.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Konyukhov V.Y., Kukartsev V.V., Antamoshkin O.A., Remezov I.S. Battery charging simulation of a passenger electric vehicle from a traction voltage inverter with an integrated charger // *World Electric Vehicle Journal*. 2025. Vol. 16. No. 7. Article no. 391. <https://doi.org/10.3390/wevj16070391>

7. Sharma V., Basak S., Ali S.W. Synthesis of copper nanoparticles on cellulosic fabrics and evaluation of their multifunctional performances // *Cellulose*. 2022. Vol. 29. P. 7973–7988. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04709-0> EDN: OMJYEF

8. Nasrollahzadeh M., Momeni S.S., Sajadi S.M. Green synthesis of copper nanoparticles using *Plantago asiatica* leaf extract and their application for the cyanation of aldehydes using $K_4Fe(CN)_6$ // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2017. Vol. 506. P. 471–477. <http://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.072>

9. Yuan H., Liu J., Lu Y., Zhao C., Cheng X., Nan H., Liu Q., Huang J., Zhang Q. Toward Practical all-solid-state batteries with sulfide electrolyte: A review // *Chemical Research in Chinese Universities*. 2020. Vol. 36. No. 3. P. 377–385. <http://doi.org/10.1007/s40242-020-0103-5>

10. Jia H., Xu W. Electrolytes for high-voltage lithium batteries // *Trends in Chemistry*. 2022. Vol. 4. No. 7. P. 627–642. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2022.04.010> EDN: ZANDKB

11. Wang X. Advanced materials for lithium-ion batteries and modification strategies in elimination of lithium dendrite. *Highlights in Science // Engineering and Technology*. 2022. Vol. 17. P. 30–37. <https://doi.org/10.54097/hset.v17i.2433>

12. Scrosati B., Abraham K.M., Van Schalkwijk W., Hassoun J. *Lithium Batteries: Advanced Technologies and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.; 2013. 374 p. <http://doi.org/10.1002/9781118615515>

13. Shi Q., Lu Ch., Cao Y., Hao Y., Bachmatiuke A, Rümmele MH. Recent developments in current collectors for lithium metal anodes // *Materials Chemistry Frontiers*. 2023. Vol. 7. P. 1298–1311. <https://doi.org/10.1039/D3QM00029J> EDN: UITPYE

14. Ghosh S., Bhattacharjee U., Bhowmik S., Martha S.K. A review on high-capacity and high-voltage cathodes for next-generation lithium-ion batteries // *Journal of Energy and Power Technology*. 2022. Vol. 1. No. 1. Article no. 002. <http://doi.org/10.21926/jept.2201002>

15. Максименко Л.А. Нормативные аспекты и практические подходы к визуализации данных // *Научная визуализация*. 2024. Т. 16. № 4. С. 120–128. <http://doi.org/10.26583/sv.16.4.11> EDN: UIHIEV

16. Савельева Е.О., Савельев И.Л., Иванников А.Л., Солодов С.В. Перспективы интеграции технологий виртуальной и дополненной реальности в интеллектуальные системы управления безопасностью труда // *Безопасность труда в промышленности*. 2025. № 8. С. 58–63. EDN: DWWOOL

Сведения об авторах

Митягин Даниил Олегович, аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; старший преподаватель кафедры физики и технической механики Института прикладной информатики и промышленного программирования МИРЭА — Российский технологический университет, 119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78; старший преподаватель кафедры АСУ, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1; ORCID: 0009-0004-1841-5922; e-mail: mityagin.danya@gmail.com

Короннов Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9854-4380, ORCID: 0000-0001-6046-3400; e-mail: koronnov@inbox.ru

Агасиева Светлана Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; eLIBRARY SPIN-код: 9696-6864; ORCID: 0000-0002-9089-1411; e-mail: agasieva-sv@rudn.ru