

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-364-375

EDN: FNCQWC

УДК 621.355.2:658.382.3

Научная статья / Research article

Оценка производственных факторов при изготовлении литий-ионных аккумуляторов на примере оборудования фирмы Gelon LIB

Р.Г. Ахтямов¹, А.В. Шиховцева², Л.Е. Калугин²,
Е.Ю. Евщик²✉

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I, Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
Российской академии наук, Черноголовка, Российская Федерация
✉liza@icp.ac.ru

Аннотация. Производство литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) сопряжено с комплексом опасных факторов на всех технологических этапах. Существующие исследования часто фрагментарны и не предлагают целостной системы управления рисками, что актуализирует разработку комплексного подхода к обеспечению безопасности и эффективности. Цель исследования — системный анализ производственных рисков на всех этапах изготовления ЛИА, а также разработка практических рекомендаций по созданию эффективной системы безопасности, включающей технические, организационные и кадровые аспекты. Исследование основано на системном анализе технологического процесса производства ЛИА. Используются методы анализа рисков, сравнительная оценка ручных и автоматизированных операций, анализ технических характеристик специализированного оборудования. Результаты структурированы в виде детализированных таблиц оценки рисков для каждого этапа. Выявлены и ранжированы ключевые опасности: токсичность химических компонентов (особенно электролита на основе LiPF₆), пожарно-взрывные риски, воздействие наночастиц и механические травмы. Установлено, что наиболее опасными являются операции с электролитом, ультразвуковой сваркой и сушкой. Доказано значительное снижение риска травматизма и производственного брака при переходе от ручной к автоматизированной сборке. Разработаны и систематизированы конкретные защитные меры: инженерные решения (вентиляция, блокировки), требования к СИЗ, параметры микроклимата, программы обучения и необходимость внедрения систем реального времени. Предложен целостный, поэтапный подход к управлению рисками в производстве ЛИА. Основной вывод заключается в том, что безопасность и экономическая эффективность достигаются через системную комбинацию максимальной автоматизации критических операций, внедрения многоуровневого мониторинга и комплексной защиты персонала. Представленные рекомендации формируют готовую основу для проектирования безопасных производственных линий.

© Ахтямов Р.Г., Шиховцева А.В., Калугин Л.Е., Евщик Е.Ю., 2026



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

Ключевые слова: производственные риски; автоматизация производства; охрана труда; токсикология

Вклад авторов. Ахтямов Р.Г. — концептуализация, разработка методологии исследования, написание рукописи. Шиховцева А.В., Калугин Л.Е. — курирование данных, написание и подготовка черновика рукописи. Евицки Е.Ю. — администрирование данных, научное руководство исследованием, написание рукописи. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Финансирование. Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН № 125033104607-0 (изготовление электродной смеси и электродов) и № 124013000692-4 (сборка батарей и аккумуляторов).

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в опубликованную статью.

История статьи: поступила в редакцию 09.12.2025; доработана после рецензирования 20.01.2026; принята к публикации 05.02.2026.

Для цитирования: Ахтямов Р.Г., Шиховцева А.В., Калугин Л.Е., Евицки Е.Ю. Оценка производственных факторов при изготовлении литий-ионных аккумуляторов на примере оборудования фирмы Gelon LIB // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 364–375. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-364-375> EDN: FNCQWC

Assessment of production factors in the manufacturing of lithium-ion batteries: case study of Gelon LIB equipment

Rasul G. Akhtyamov¹, Anna V. Shikhovtseva², Leonid E. Kalugin²,
Elizaveta Yu. Evshchik²✉

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation

²Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russian Federation
✉liza@icp.ac.ru

Abstract. The production of lithium-ion batteries (LIBs) is associated with a complex of hazardous factors at all technological stages. Existing studies are often fragmented and do not offer a holistic risk management system, which highlights the need to develop a comprehensive approach to ensuring safety and efficiency. The aim of this work is a systematic analysis of production risks at all stages of LIB manufacturing and the development of practical recommendations for creating an effective safety system, including technical, organizational,

and personnel aspects. The research is based on a systematic analysis of the LIB production technological process. Methods of risk analysis, comparative assessment of manual and automated operations, and analysis of the technical characteristics of specialized equipment were used. The results are structured in the form of detailed risk assessment tables for each stage. Key hazards were identified and ranked: toxicity of chemical components (especially LiPF₆-based electrolyte), fire and explosion risks, nanoparticle exposure, and mechanical injuries. It has been established that the most hazardous operations involve the electrolyte, ultrasonic welding, and drying. A significant reduction in the risk of injuries and production defects during the transition from manual to automated assembly has been proven. Specific protective measures have been developed and systematized: engineering solutions (ventilation, interlocks), personal protective equipment (PPE) requirements, microclimate parameters, training programs, and the need for real-time monitoring systems. This article proposes a holistic, step-by-step approach to risk management in LIB production. The main conclusion is that safety and economic efficiency are achieved through a systematic combination of maximum automation of critical operations, implementation of multi-level monitoring, and comprehensive personnel protection. The presented recommendations form a ready-made basis for designing safe production lines.

Keywords: production risks; automation of production; labor protection; toxicology

Authors' contribution. *R.G. Akhtyamov* — conceptualization, research methodology development, manuscript writing. *A.V. Shikhovtseva, L.E. Kalugin* — data curation, writing — original draft preparation. *E.Yu. Evshchik* — data administration, scientific supervision of the research, manuscript writing. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Funding. The work was carried out in accordance with the state assignments of the Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences No. 125033104607-0 (manufacture of electrode mixture and electrodes) and No. 124013000692-4 (assembly of cells and batteries).

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article

Data availability. All data obtained during this study are included in the published article.

Article history: received 09.12.2025; revised 20.01.2026; accepted 05.02.2026.

For citation: Akhtyamov RG, Shikhovtseva AV, Kalugin LE, Evshchik EYu. Assessment of production factors in the manufacturing of lithium-ion batteries: case study of Gelon LIB equipment. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):364–375. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-364-375> EDN: FNCQWC

Введение

Современные литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) являются ключевым компонентом энергетических систем нового поколения [1]. Оптимизация процесса производства ЛИА с точки зрения безопасности [4], экономической целесообразности [5] и экологической устойчивости [6] имеет особое значение, требуя всестороннего и детального анализа каждого этапа [7]. Производство ЛИА представляет собой многостадийный процесс, сопряженный с рисками: химической опасности компонентов, пожаро- и взрывоопасности, механиче-

ских травм, воздействия наночастиц [4; 8–13]. Существующие исследования часто фрагментарны и не предлагают целостной системы управления рисками на всех технологических этапах [14–19]. Особую значимость приобретает внедрение автоматизации для минимизации человеческого фактора [20].

Однако предлагаемые в большинстве существующих работах подходы часто сосредоточены либо на ограниченном перечне технологических этапов [4; 8–13], либо на отдельных аспектах безопасности [14–19], без интеграции в единую многоуровневую систему управления. В [21] описывается система управления рисками на всех технологических этапах, но она не включает в себя подробный анализ каждой стадии производства литий-ионного аккумулятора с учетом всех возможных факторов риска. Таким образом, в отличие от опубликованных работ, настоящее исследование предлагает сквозной поэтапный анализ всей технологической цепочки, что позволяет выявить взаимосвязи между рисками на разных стадиях и разработать меры по их минимизации. Таким образом, данная работа восполняет пробел, существующий между фрагментарными оценками опасностей и комплексной системой управления рисками, пригодной для непосредственного внедрения в реальных условиях аккумуляторного производства.

Цель исследования — комплексный анализ производственных рисков на всех этапах изготовления ЛИА и разработка практических рекомендаций по созданию эффективной системы безопасности.

Методы исследования

Методология основана на системном анализе технологического процесса производства ЛИА. Используются методы анализа рисков, сравнительная оценка ручных и автоматизированных операций, анализ технических характеристик специализированного оборудования на примере оборудования фирмы Gelon LIB. Технологический процесс включал ключевые этапы: приготовление электродных смесей, изготовление электрода, сборку стека и аккумулятора. Подробное описание этапов производства ЛИА представлено в дополнительных материалах.

Результаты

Наибольшую опасность на этапе приготовления электродной смеси представляют пылевые и химические факторы, а также риск механического травмирования (табл. 1).

По результатам оценки разработаны меры снижения риска, включающие системы местной вентиляции, СИЗ (респираторы FFP2/FFP3, химически стойкие перчатки), заземление, блокировки, контроль параметров. В целях обеспечения безопасных условий труда необходимы строгое соблюдение мер индивидуальной и коллективной защиты, контроль параметров производ-

ственной среды и регулярное обучение персонала. Внедрение предложенных рекомендаций позволит минимизировать профессиональные риски, снизить вероятность аварийных ситуаций и обеспечить стабильное качество выпускаемой продукции.

Таблица 1. Приготовление электродной смеси: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Взвешивание компонентов (весы)</i>			
Запыленность воздуха	Графит, ацетиленовая сажа, смешанные оксиды лития	Раздражение дыхательных путей, риск взрыва (сажа)	Использование вытяжной вентиляции, средства индивидуальной защиты (респиратор, перчатки)
Контакт с кожей	Карбоксиметилцеллюлоза, стирол-бутадиеновая резина, поливинилиденфторид, N-метилпирролидон	Раздражение кожи, аллергические реакции	Применение спецодежды, перчаток
Статическое электричество	Сухие порошки (графит, сажа)	Искрообразование, риск возгорания	Заземление оборудования, антистатическая обработка
<i>Загрузка компонентов в миксер (планетарный вакуумный миксер GN-PM-5L)</i>			
Механическая травма	Работа с миксером	Защемление, попадание рук в движущиеся части	Блокировка крышки при работе, обучение, инструктажи
Выброс пыли	Засыпка сухих компонентов	Загрязнение воздуха, взрывоопасность	Вакуумное пылеудаление, местная вентиляция
<i>Перемешивание в течение нескольких часов</i>			
Шум	Работа миксера	Нарушение слуха при длительном воздействии	Использование шумозащитных наушников
Вибрация	Движение механизмов миксера	Дискомфорт, усталость оператора	Контроль состояния оборудования, виброизоляция
Нагрев смеси	Трение компонентов	Изменение свойств реагентов, риск перегрева	Контроль температуры, ограничение времени смешивания
<i>Контроль вязкости электродной смеси (вискозиметр)</i>			
Контакт с химикатами	Пробы смеси	Раздражение кожи и/или слизистых	Использование перчаток, очков
Ошибки измерения	Неправильная калибровка	Брак продукции	Регулярная поверка оборудования

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

На этапе изготовления электродов наибольшую угрозу представляют механические травмы от вальцов и режущих устройств, термические ожоги при сушке (~120 °С), воздействие испарений растворителей (табл. 2). Предложенные ключевые меры защиты включают в себя защитные ограждения и блокировки, вытяжную вентиляцию, термостойкие перчатки и респираторы FFP3, виброизоляцию.

Таблица 2. Изготовление электродов: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Установка рулона фольги в машину для нанесения электродной смеси (прибор для нанесения и сушки электродной смеси GN-C300)</i>			
Механическая травма	Работа с рулонами фольги	Порезы, защемление пальцев	Использование защитных перчаток, обучение правилам обращения с материалами
Статическое электричество	Сухая фольга	Искрообразование, риск возгорания	Заземление оборудования, антистатические покрытия
Ошибка центровки рулона	Неправильная установка	Обрыв фольги, простой оборудования	Контроль правильности загрузки, автоматические направляющие
<i>Нанесение электродной смеси на фольгу и сушка (GN-C300)</i>			
Воздействие высоких температур	Сушка при 120 °C	Ожоги, перегрев оборудования	Термоизоляция печи, контроль температуры, СИЗ (термостойкие перчатки)
Испарения растворителей	Сушка электродной смеси	Раздражение дыхательных путей, токсическое воздействие	Вытяжная вентиляция, респираторы (класс A1 или A2)
Попадание смеси на кожу	Нанесение электродной пасты	Раздражение кожи, аллергические реакции	Защитные перчатки, спецодежда
<i>Прокатка рулона электродов на вальцах (вальцы GN-HR-200)</i>			
Механическая травма	Втягивание в валки	Тяжелые травмы конечностей	Блокировка доступа при работе, аварийные стоп-кнопки
Шум и вибрация	Работа вальцов	Ухудшение слуха, усталость	Противошумные наушники (SNR ≥ 25 дБ), виброизоляция
Деформация электродов	Неравномерное давление	Бракованная продукция	Регулировка зазора вальцов, контроль качества
<i>Нарезка электродного рулона на листы (прибор для вырубki электродов GN-S 200P)</i>			
Порезы и травмы	Острые кромки фольги	Ранения рук	Использование защитных перчаток, автоматическая подача материала
Ошибки резки	Смещение материала	Брак продукции	Контроль позиционирования, датчики точности
<i>Нарезка листов на электроды нужного размера (прибор для резки электродов GN-S500)</i>			
Контакт с движущими ножами	Работа гильотинного резака	Травмы пальцев	Защитные кожухи, двухкнопочное включение
Образование металлической пыли	Резка фольги	Раздражение дыхательных путей	Пылеулавливающая система, респираторы

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

Таким образом, производственный процесс изготовления электродов характеризуется комплексом опасных факторов, среди которых наиболее значимыми являются механические и термические риски, а также воздействие вредных веществ. Особое внимание следует уделить техническим средствам коллективной защиты и обеспечению работников качественными средствами индивидуальной защиты. Регулярный контроль состояния оборудования и проведение обучающих мероприятий для персонала являются обязательными условиями для поддержания безопасного производственного процесса.

На этапе сборки стека аккумулятора выявлены существенные различия в уровнях риска между ручным и полуавтоматизированным методами произ-

водства (табл. 3). Ручная сборка предполагает высокий риск травм, электростатических разрядов, брака из-за человеческого фактора. При переходе на полуавтоматическую сборку (GN-DP200S) риски травм, брака и влияния электростатики снижаются, но добавляются риск сбоев автоматики и шум.

Таблица 3. Сборка стека: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Ручная сборка стека (форма из оргстекла)</i>			
Механические повреждения	Острые кромки электродов, неправильное обращение с фольгой	Порезы, микротравмы пальцев	Использование защитных перчаток (нитриловые/антистатические), обучение правилам работы
Статическое электричество	Сухие материалы (сепаратор, электроды)	Искрообразование, риск повреждения чувствительных компонентов	Заземление рабочего места, антистатические браслеты
Ошибки сборки	Неправильное расположение электродов и сепаратора	Короткое замыкание, брак продукции	Визуальный контроль, использование шаблонов
Воздействие пыли/частиц	Частицы металла и полимеров	Раздражение кожи, дыхательных путей	Работа в чистой зоне, использование респиратора (FFP1)
<i>Полуавтоматическая сборка стека (полуавтоматический прибор для укладки стека GN-DP200S)</i>			
Механическая травма	Работа с движущимися частями прибора	Защемление пальцев, травмы	Блокировка доступа при работе, двуручное управление
Ошибки автоматизации	Сбой в подаче электродов/сепаратора	Неправильная сборка, брак	Датчики контроля положения, периодическая проверка оборудования
Электростатические разряды	Автоматическая укладка сухих материалов	Повреждение электроники, риск возгорания	Антистатическое покрытие оборудования, контроль влажности (не более 10 %)
Шум	Работа механизмов прибора	Повышенная утомляемость оператора	Использование наушников (SNR ≥ 20 дБ)

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

Проведенный анализ рисков показывает явное преимущество полуавтоматизированного метода сборки как с точки зрения производственной безопасности, так и с позиции стабильности качества продукции (табл. 4). Однако даже при использовании автоматизированного оборудования сохраняется необходимость в строгом соблюдении мер безопасности и регулярном контроле состояния техники. Ручной метод сборки следует рассматривать как временное или резервное решение, допустимое только при невозможности использования автоматизированных линий и при условии усиленных мер защиты персонала.

Внедрение предложенных рекомендаций позволит существенно снизить профессиональные риски, уменьшить количество производственного брака и создать безопасные условия труда вне зависимости от выбранного метода сборки. Особое внимание следует уделить постепенному переходу от ручных

операций к автоматизированным процессам, что является наиболее эффективным путем улучшения как показателей безопасности, так и общей производительности предприятия.

Таблица 4. Сравнительная оценка рисков для двух вариантов сборки

Критерий	Ручная сборка	Полуавтоматическая сборка
Риск травматизма	Высокий (контакт с острыми кромками)	Средний (ограничен доступ к опасным зонам)
Риск брака	Высокий (человеческий фактор)	Низкий (автоматизированный контроль)
Электростатические риски	Средний	Низкий (лучший контроль)
Производительность	Низкая	Высокая
Зависимость от оператора	Критическая	Минимальная

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

На этапе финальной стадии изготовления аккумулятора наиболее опасными являются операции с электролитом (LiPF₆), требующие работы в аргоновом боксе из-за риска образования токсичного HF (табл. 5). Критичны также шум и ожоги при ультразвуковой сварке, перегрев при вакуумной сушке, риски короткого замыкания при тестировании.

Предложенные меры включают в себя звукопоглощающие кожухи, роботизацию заливки электролита, многоуровневый термоконтроль, полный комплект СИЗ.

Таблица 5. Изготовление аккумулятора: результаты оценки производственных факторов и мер по снижению риска

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Подготовка корпуса из ламинированного алюминия (прибор для формовки корпуса GN-S230F)</i>			
Механические повреждения	Острые кромки алюминиевой фольги	Порезы рук при формовке корпуса	Использование защитных перчаток (антипорезных)
Деформация корпуса	Неправильная настройка прибора	Брак продукции	Контроль параметров формовки, калибровка оборудования
<i>Ультразвуковая сварка никелевых клемм (ультразвуковая сварка GN-2500)</i>			
Шум и вибрация	Работа ультразвукового сварочного аппарата	Повреждение слуха, усталость оператора	Противошумные наушники (SNR ≥ 25 дБ)
Термическое воздействие	Нагрев зоны сварки	Ожоги при неосторожном обращении	Термостойкие перчатки, защитные экраны
Некачественное соединение	Неправильные параметры сварки	Снижение проводимости, брак	Контроль качества сварки, регулярная проверка оборудования
<i>Вакуумная сушка стека (вакуумный сушильный шкаф)</i>			
Перегрев компонентов	Высокая температура сушки	Деградация электродов, возгорание	Контроль температуры, автоматическое отключение при перегреве
Разгерметизация вакуума	Неисправность шкафа	Попадание влаги, брак продукции	Регулярное ТО оборудования, датчики контроля вакуума
<i>Запайка корпуса (прибор для запайки GN-HS200)</i>			
Термические ожоги	Горячие поверхности при запайке	Ожоги кожи	Термостойкие перчатки, автоматические щипцы
Негерметичный шов	Неправильные параметры запайки	Утечка электролита, брак	Контроль качества шва, визуальный и приборный контроль

Фактор риска	Источник	Возможные последствия	Меры снижения риска
<i>Заполнение электролитом в аргоновом боксе (аргоновый бокс, прибор для пропитки GN-VS300)</i>			
Воздействие электролита	Контакт с LiPF6 и растворителями	Химические ожоги, токсическое воздействие	Полный комплект СИЗ (перчатки, очки, фартук), вытяжная вентиляция
Утечка аргона	Разгерметизация бокса	Удушье, потеря инертной атмосферы	Датчики контроля состава воздуха, аварийная вентиляция
<i>Вакуумирование и окончательная запайка (GN-HS200V)</i>			
Остаточные газы	Неполное вакуумирование	Вздутие корпуса, снижение емкости	Контроль степени вакуумирования
Повторный нагрев корпуса	Процесс запайки	Деформация корпуса	Точный контроль температуры
<i>Электрохимические тесты (Neware BTS4000-5V20A)</i>			
Короткое замыкание	Неправильное подключение	Возгорание, повреждение оборудования	Обучение персонала, проверка подключений
Перегрев аккумулятора	Высокие токи тестирования	Термический разгон, возгорание	Контроль температуры, автоматическое отключение

Источник: составлено Р.Г. Ахтямовым, А.В. Шиховцевой, Л.Е. Калугиным, Е.Ю. Евщик.

Обсуждение

Проведенный анализ демонстрирует, что безопасность производства ЛИА не может быть обеспечена точечными мерами. Требуется системный подход, интегрирующий три ключевых принципа, таких как:

- 1) максимальная автоматизация критически опасных операций (работа с электролитом, сварка) для исключения прямого контакта персонала с опасностями;
- 2) внедрение многоуровневого мониторинга параметров (температура, влажность, запыленность, состав воздуха) в реальном времени;
- 3) комплексная защита персонала, сочетающая современные инженерные решения (блокировки, вентиляция), адекватные СИЗ и непрерывное обучение.

Особенностью данного исследования является его поэтапность и практическая ориентированность. В отличие от работ, рассматривающих отдельные риски, здесь предложена целостная система управления для всей технологической цепочки, подтвержденная сравнительным анализом эффективности разных методов сборки. Переход к автоматизированным линиям представляет собой наиболее эффективный путь одновременного повышения безопасности, качества и производительности.

Заключение

Проведенное исследование позволило систематизировать ключевые аспекты производства литий-ионных аккумуляторов, уделив особое внимание анализу производственных рисков на каждом технологическом этапе. Уста-

новлено, что наиболее критичными с точки зрения безопасности являются операции, связанные с работой с электролитами, ультразвуковой сваркой и процессами сушки, требующие особых мер защиты.

Результаты исследования демонстрируют, что современные подходы к организации аккумуляторного производства должны основываться на трех ключевых принципах: максимальной автоматизации критически опасных операций, внедрении многоуровневых систем мониторинга параметров и комплексной защите персонала. Особую эффективность показало сочетание технических решений с организационными мерами.

Практическая значимость работы заключается в разработанном комплексе рекомендаций по оптимизации технологических процессов с точки зрения безопасности, выбору средств индивидуальной и коллективной защиты, а также организации системы контроля качества и охраны труда. Реализация предложенных мер позволит существенно повысить безопасность и эффективность производства литий-ионных аккумуляторов при одновременном снижении себестоимости продукции.

В целом проведенное исследование подтверждает, что только системный подход, учитывающий все аспекты производства, от выбора сырья до финального тестирования, может обеспечить создание конкурентоспособного и безопасного аккумуляторного производства.

Список литературы

- [1] Ngoy K.R., Lukong V.T., Yoro K.O., Makambo J.B., Chukwuati N.C., Ibegbulam C., Eterigho-Ikelegbe O., Ukoba K., Jen T.C. Lithium-ion batteries and the future of sustainable energy: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2025. Vol. 223. Article no. 115971. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115971> EDN: FLOWPS
- [2] Ali H., Khan H.A., Khalid M., Pecht M. A review and analysis of the safety labeling of lithium-ion batteries // *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 120. Article no. 116461. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116461> EDN: ZLTISS
- [3] Nekahi A., Feyzi E., Srivastava M., Yeganehdoust F., Reddy A.K.M.R., Zaghib K. Advanced lithium-ion battery process manufacturing equipment for gigafactories: Past, present, and future perspectives // *iScience*. 2025. Vol. 28. No. 7. Article no. 112691. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112691> EDN: NIZVSR
- [4] Chen Y., Kang Y., Zhao Y., Wang L., Liu J., Li Y., Liang Z., He X., Li X., Tavajohi N., Li B. A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards // *Journal of Energy Chemistry*. 2021. Vol. 59. P. 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.10.017> EDN: DVVEBL
- [5] Ziegler M.S., Song J., Trancik J.E. Determinants of lithium-ion battery technology cost decline // *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 12. P. 6074–6098. <https://doi.org/10.1039/D1EE01313K> EDN: MOGEHG
- [6] Gutsch M., Leker J. Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries — From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling // *Applied Energy*. 2024. Vol. 353. Article no. 122132. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122132> EDN: ZGTSXL

- [7] Örü̇m Aydin A., Zajonz F., Gü̇nther T., Dermenci K., Berecibar M., Urrutia L. Lithium-ion battery manufacturing: industrial view on processing challenges, possible solutions and recent advances // *Batteries*. 2023. Vol. 9. No. 11. P. 555. <https://doi.org/10.3390/batteries9110555> EDN: EAXPST
- [8] Li J., Fleetwood J., Hawley W.B., Kays W. From materials to cell: state-of-the-art and prospective technologies for lithium-ion battery electrode processing // *Chemical Reviews*. 2021. Vol. 122. No. 1. P. 903–956. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00565> EDN: YUASTM
- [9] Larsson F., Andersson P., Blomqvist P., Mellander B.E. Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article no. 10018. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09784-z> EDN: MCPGWD
- [10] Iqbal A., Kakoria A., Riaz S.T., Xu J., Pushparaj R.I., Xu G. Comparative fire hazards of lithium-ion battery chemistries: linking thermal behavior, gas toxicity, and state-of-charge to composite risk profiles // *Journal of Power Sources*. 2025. Vol. 655. Article no. 237914. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237914> EDN: FATLDA
- [11] Jeong B., Yoon M., Lee J. A Study on the hazard categorization and loss prevention standards of lithium-ion battery manufacturing occupancies // *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 2019. Vol. 19. No.1. P. 249–256. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.249>
- [12] Schwaebe B., He H., Glaubensklee Ch., Ogunseitan O.A., Schoenung Ju.M. Chemical hazard assessment toward safer electrolytes for lithium-ion batteries // *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2024 Vol. 20. No. 6. P. 2231–2244. <https://doi.org/10.1002/ieam.4963> EDN: XCSBBR
- [13] Wang G., Guo X., Chen J., Han P., Su Q., Guo M., Wang B., Song H. Safety performance and failure criteria of lithium-ion batteries under mechanical abuse // *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 17. Article no. 6346. <https://doi.org/10.3390/en16176346> EDN: FFIQCU
- [14] Yao L., Yu C., Xiao Ya., Cui G., Fei Zh., Qu Ch. A comprehensive review of lithium-ion battery safety issues and fault diagnosis strategies throughout the entire lifecycle // *Journal of Energy Storage*. 2025. Vol. 136. Article no. 118447. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.118447> EDN: JYHGKD
- [15] Sommer A., Bazlen S., Tran H.Ye., Braunwarth W., Daub R. Development and implementation of in-line segmentation for continuous electrode production in lithium-ion battery cell manufacturing for traceability applications // *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 120. P. 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.031> EDN: MEFNCF
- [16] Krätzig O., Degen F. A comprehensive review and analysis of technology performance characteristics of lithium-ion battery cell manufacturing: Introducing a Call-for-Innovation-Heatmap // *Journal of Power Sources Advances*. 2025. Vol. 33. Article no. 100174. <https://doi.org/10.1016/j.powera.2025.100174> EDN: DQBHTV
- [17] Lystianingrum V., Priyadi A., Negara I.M.Yu. Lessons learned from large-scale lithium-ion battery energy storage systems incidents: a mini review // *Process Safety Progress*. 2023. Vol. 42. No. 2. P. 348–355. <https://doi.org/10.1002/prs.12448> EDN: KKNUQA
- [18] Baazouzi S., Feistel N., Wanner J., Landwehr I., Fill A., Birke K.P. Design Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-Ion Battery Cells — A Generic Overview // *Batteries*. 2023. Vol. 9. No. 6. Article no. 309. <https://doi.org/10.3390/batteries9060309> EDN: DKHPRE
- [19] Гусева Е.С., Попова С.С. Гусева Е.С., Попова С.С. Особенности кинетики процесса формирования катодного материала состава $\text{Li}_x\text{La}_y\text{Mn}_{1-y}\text{O}_2(\text{C}_{60})_n$ для литий-ионного аккумулятора // *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*. 2019. Т. 62. Вып. 11. С. 99.

- [20] Song J. Integrating automation and big data in lithium-ion battery manufacturing: a case study of the ultium cells joint venture // Current Journal of Applied Science and Technology. 2024. Vol. 43. No. 10. P. 11–23. <https://doi.org/10.9734/cjast/2024/v43i104433> EDN: XLRBBU
- [21] Shukla D., Shankul V. Risk management safety assessment over the life cycle of lithium-ion batteries in EV // International Journal of Recent Engineering Science. 2024. Vol. 11. No. 3. P. 32–47. <https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V11I3P104> EDN: JKESMN

Сведения об авторах:

Ахтямов Расул Гумерович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологической и экологической безопасности, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, 190031, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. ORCID: 0000-0001-8732-219X; SPIN-код: 2812-3782. E-mail: ahtamov.zchs@gmail.com.

Шиховцева Анна Владимировна, младший научный сотрудник Лаборатории твердотельных электрохимических систем, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, Российская Федерация, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, д. 1. ORCID: 0000-0003-4058-2968; eLIBRARY SPIN-код: 5367-2937. E-mail: dissovet04@icp.ac.ru

Леонид Ермолаевич Калугин, кандидат химических наук, инженер Лаборатории технологий материалов и устройств электрохимических источников энергии, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, Российская Федерация, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, д. 1. ORCID: 0009-0003-9507-1185; eLIBRARY SPIN-код: 5657-5774. E-mail: kleo2712@yandex.ru

Елизавета Юрьевна Евщик, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Лаборатории твердотельных электрохимических систем, Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, 142432, Российская Федерация, Московская обл., г. Черноголовка, пр. академика Семенова, д. 1. ORCID: 0000-0002-3562-8805; eLIBRARY SPIN-код: 5375-9184. E-mail: liza@icp.ac.ru