

Научная статья
УДК 614.841
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.90.027

О необходимости разработки пожаробезопасных контейнеров для транспортировки литий-ионных аккумуляторов

*Татьяна Петровна Макарова
Николай Викторович Мартинович
Алексей Николаевич Батуро*

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Петровна Макарова, tattomakarova@yandex.ru

Аннотация. Стремительный рост использования и производства литий-ионных аккумуляторов (далее – ЛИА) во многих отраслях сопровождается увеличением числом пожароопасных ситуаций. Традиционные логистические контейнеры не предназначены для сдерживания специфичных пожароопасных факторов, характерных для ЛИА: тепловой разгон, выделение горючих газов и интенсивное тепловыделение. Что создает угрозу для объектов транспортной инфраструктуры, других грузов и жизни людей, что обуславливает необходимость специализированных пожаробезопасных решений. В статье представлен анализ и обобщение данных о происшествиях при транспортировке ЛИА, существующих требований к упаковке и исследований, посвященных особенностям пожарной опасности ЛИА. Выявлены пробелы в существующей нормативной базе и как следствие типовых логистических контейнеров, не обеспечивающих сдерживание теплового разгона ЛИА. В ходе проведенного анализа определены базовые принципы проектирования пожаробезопасных контейнеров: пассивная огнезащита в виде применения термостойких изоляционных материалов), активное подавление (встроенные системы пожаротушения) и устройство взрывобезопасных элементов для сброса давления. Предложена гипотеза об эффективности многоуровневой защиты, направленной на разрыв цепочки развития пожароопасной ситуации ЛИА.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, пожарная безопасность, тепловой разгон, транспортировка, пожаробезопасный контейнер, подавление пожара

Для цитирования: Макарова Т.П., Мартинович Н.В., Батуро А.Н. О необходимости разработки пожаробезопасных контейнеров для транспортировки литий-ионных аккумуляторов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 3 (38). С. 285-292. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.90.027>.

Original article.

About necessity of development fire-safe containers for transporting lithium-ion batteries

Tatyana P. Makarova

Nikolay V. Martinovich

Alexey N. Batur

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: Tatyana P. Makarova, tattomakarova@yandex.ru

Abstract. The rapid growth in the use and production of lithium-ion batteries (hereinafter - LIA) in many industries is accompanied by an increase in the number of fire hazardous situations. Traditional logistics containers are not designed to contain specific fire hazards characteristic of LIAs: thermal acceleration, release of combustible gases and intense heat generation. This poses a threat to transport infrastructure, other goods and people's lives, which necessitates specialized fire-safe solutions. The article presents an analysis and summary of data on incidents during the transportation of LIAs, existing requirements for packaging and studies on the features of fire hazard of LIAs. Deficiencies (gaps) were identified in the existing regulatory framework and, as a result, typical logistics containers that do not provide containment of thermal acceleration of LIA. In the course of the analysis, the basic principles for the design of fireproof containers were determined: passive fire protection in the form of the use of heat-resistant insulating materials), active suppression (built-in fire extinguishing systems) and the installation of explosion-proof elements for pressure relief. A hypothesis is proposed on the effectiveness of multilevel protection aimed at breaking the chain of development of a fire hazard situation LIA.

Keywords: lithium-ion batteries, fire safety, thermal acceleration, transportation, fire-safe container, fire suppression

For citation: Makarova T.P., Martinovich N.V., Batur A.N. On the need to develop fire-safe containers for transporting lithium-ion batteries // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 3 (38). С. 285-292. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.90.027>.

Введение

Начиная с конца первого десятилетия XXI века, наблюдается устойчивый рост мирового производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) [1] и их использования во всех сферах жизни: гаджетах, промышленности, медицине, транспортных средствах [2]. Однако вместе с ростом популярности ЛИА увеличивается и число пожаров с их участием. Применение ЛИА характеризуются повышенной пожароопасностью, и их распространённость в различных сферах жизнедеятельности влечет за собой увеличение рисков их аварийного режима работы. Как отмечают исследователи [1-9], основной причиной возгораний является тепловой разгон — необратимый самоускоряющийся процесс, инициируемый механическими повреждениями, перезарядкой, кратковременным замыканием или производственным дефектом. Помимо опасностей возгорания ЛИА при их использовании, существуют опасности, связанные с транспортировкой аккумуляторов. Так в 2023 году на японском грузовом судне MV Freemantle Highway, перевозившем тысячи автомобилей, произошел пожар, официальной причиной которого было возгорание ЛИА в одном из электромобилей. Инцидент привел к гибели одного члена экипажа и значительному материальному ущербу в результате распространения пожара по грузу на борту. Аналогичная ситуация произошла в 2022 году на грузовом судне Felicity Ace, перевозившего порядка 4000 автомобилей из Германии в США. От последствий пожара судно затонуло в Атлантическом океане и общие убытки оцениваются в сотни миллионов долларов. Помимо водного транспорта, зафиксировано множество инцидентов с возгоранием ЛИА в электронных устройствах на бортах пассажирских самолетов. В 2020 году произошел пожар в аэропорту Гонконга, где загорелась партия литий-ионных аккумуляторов на этапе подготовки

воздушного судна к отправке. Также известен случай крушения самолета Boeing 747-400 в 2010 году, выполнявший рейс из Дубая в Дохар, причиной которого стал пожар в грузовом отсеке из-за тепловой реакции в партии ЛИА. Проблема возгорания ЛИА при их транспортировке отмечена в работах [3-5]. Таким образом, рост объемов, перевозимых ЛИА приводит к возрастанию рисков возникновения пожаров, что обуславливает необходимость разработки комплексных мер по обеспечению пожарной безопасности для транспортировки данного вида груза.

В связи с этим цель настоящей статьи – обосновать необходимость и сформулировать базовые принципы специализированных пожаробезопасных контейнеров для транспортировки ЛИА. Для достижения цели предполагается решение следующих задач:

1. Провести анализ пожарной опасности ЛИА и механизм образования теплового разгона.
2. Выявить недостатки существующей нормативной базы и типовых логистических решений.
3. Обосновать концепцию и ключевые принципы конструкции пожаробезопасного контейнера.

Основная часть

С 70-х годов XX века стремительное развитие ЛИА привело к появлению различных моделей, первыми из которых были аккумуляторы, где в качестве анода использовался металлический литий, а катод изготавливался из дисульфата титана или дисульфата молибдена [6]. Однако такие аккумуляторы обладали существенным недостатком: они были склонны к возгоранию и отличались низкой стабильностью. Это было обусловлено образованием дендридов (микроскопических древовидных структур) в процессе многократных циклов зарядки [6]. Эти дендриды прорастали через сепаратор аккумулятора, разделяющий катод и анод и вызывали внутреннее короткое замыкание. В результате происходил резкий тепловой разгон, приводящий к воспламенению или даже взрыву аккумулятора [6]. Однако прорывное решение, предложенное в 1980-х годах и отмеченное Нобелевской премией по химии в 2019 году, привело к появлению новой конструкции аккумулятора с катодом из LiCoO_2 катода и углеродного анода. Новая конструкция кардинально снизила риск возгорания ЛИА, но не исключила его полностью. В настоящее время данную проблему решают на уровне инженерных решений путем совершенствования состава и конструкции ЛИА. Несмотря на постоянное совершенствование электрохимической конструкции и систем управления ЛИА в настоящее время сохраняются проблемы в их противопожарной защите, особенно в условиях транспортировки. Данная уязвимость обусловлена неизбежностью воздействия ряда факторов, приводящих к горению и даже взрыву аккумуляторов:

1. Механические (деформация, повреждение корпуса), возникающие в результате физического воздействия на груз в ходе транспортировки [3;7].
2. Внешнее тепловое воздействие [8], которое также вероятно при нарушении условий хранения ЛИА или неосторожном обращении с огнем на этапе транспортировки. Внешний нагрев – основная причина теплового разгона ЛИА [8].
3. Производственные дефекты и старение. Несмотря на фундаментальный принцип теории надежности, согласно которому при эксплуатации и хранении оборудования в соответствии с технической документацией не должны создаваться условия для возникновения пожароопасной ситуации, а также существующих испытаний ЛИА на безопасность [10;11], известны случаи самопроизвольного теплового разгона как новых аккумуляторов вследствие производственных дефектов, так и аккумуляторов, находящихся в эксплуатации по причине старения.

Хотя имеется несколько факторов, инициирующих тепловой разгон ЛИА, представляется возможным описать физико-химические особенности процесса возгорания аккумуляторов.

Важно обозначить определение теплового разгона ЛИА – необратимый самоускоряющийся экзотермический процесс внутри литий-ионного аккумулятора, приводящий к его разрушению, воспламенению и (или) взрыву [1;3]. Его особенность заключается в цепной реакции, при которой выделяемое тепло способствует дальнейшему росту температуры и разрушению элементов аккумулятора [2]. Процесс теплового разгона представляет собой последовательность взаимосвязанных стадий, описанных в работах [1-3;6]:

1. Начальная стадия нагрева (60-90 °С).

Как уже упоминалось ранее, начало рассматриваемого аварийного режима работы ЛИА происходит в результате теплового воздействия или механическом воздействии. На данной стадии начинается разложение внешнего слоя на аноде, который является ионопроводящим защитным барьером [8], его разрушение образует открытую поверхность анода и приводит к экзотермическим реакциям с электролитом [1,2].

2. Разрушение анода и газообразование (90-110 °С).

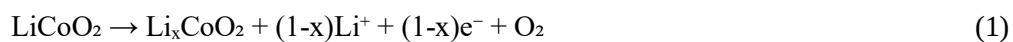
При температуре 90 °С происходит дальнейшее разрушение анода [6]. Электролит вступает в реакцию с незащищенным анодом, что приводит к активному выделению горючих газов: этана (C₂H₆), метана (CH₄), этилена (C₂H₄) и других углеводородов [2]. Давление внутри корпуса аккумулятора начинает расти.

3. Разложение сепаратора и внутренней короткое замыкание (около 135°С).

На данной стадии происходит прямой контакт катода и анода, что вызывает внутреннее короткое замыкание. Электрохимическая энергия, запасенная в аккумуляторе, высвобождается практически мгновенно, генерируя выделение большого количества тепла [3;7].

4. Разложение катодного материала и выделение кислорода (свыше 180 °С).

Ключевая физико-химическая особенность горения ЛИА – выделение кислорода (1), который является внутренним окислителем и поддерживает горение органических компонентов, что приводит к интенсивному развитию реакции и затруднению тушения традиционными методами [1,9].



5. Вскрытие корпуса, выброс пламени и пожар (свыше 200 °С).

Давление горючих газов и паров достигает критической точки, происходит разгерметизация или взрывное вскрытие корпуса аккумулятора [6,7]. Температура пламенного горения может достигать 680–720 °С [12;13]. Процесс может перекинуться на соседние ячейки в батарее, вызывая каскадный тепловой разгон [1].

Критический анализ соответствующих стандартов — ГОСТ Р МЭК 61960-2007, МЭК 60086-4, ГОСТ 12.2.007.12-88 [11;14-15] и правил перевозки грузов [16] показывает, что данные стандарты подробно регламентируют испытания на удары, вибрацию, перегрев, короткое замыкание и даже принудительный разряд. Тем не менее, необходимо отметить, что данная нормативная база в основном ориентирована на предотвращение инициирования теплового разгона, а не на его локализацию и сдерживание в случае его возникновения. Ни в одном из стандартов не предусмотрено обязательное применение материалов, способных ограничивать распространения пожара и (или) снижать температуру внутри контейнера.

Таким образом, возможно сделать вывод о том, что в настоящее время стандарты и технические решения не учитывают физико-химическую специфику горения аккумуляторов и не предусматривают применения эффективных средств пассивной защиты и как следствие не обеспечивают безопасность современной логистики ЛИА.

Обсуждение результатов

Как было уже отмечено, существующие правила в основном направлены на предотвращение инициирования теплового разгона аккумуляторов в ходе их обычной эксплуатации (защита от КЗ, перезаряда), но не предусматривают ряд эффективных

мер по сдерживанию и локализации уже начавшегося процесса горения ЛИА в одном отсеке (контейнере), чтобы не допустить распространения на всю партию.

С учетом приведенных сведений о физико-химических особенностях горения ЛИА представляется возможным проработать концепцию пожаробезопасного контейнера. Для замедления передачи тепла к соседним контейнерам и во внешнюю среду в первую очередь следует обратить внимание на пассивную огнезащиту и термическую изоляцию стенок контейнера (применение термостойких изоляционных материалов). Однако, этого может быть недостаточно для ликвидации пламени и подавления химической реакции внутри контейнера. В отличие от большинства горючих материалов, процесс горения которых зависит от внешнего окислителя (кислорода воздуха) и может прекратиться при его недостатке, тепловой разгон литий-ионных аккумуляторов протекает с выделением собственного окислителя из разлагающегося катодного материала, что делает этот процесс самоподдерживающимся даже в замкнутом пространстве контейнера. В этой связи предполагается рассмотреть разработку средств активного подавления и флегматизации внутри пожаробезопасного контейнера. Так как горение ЛИА сопровождается ростом давления, то важно обеспечить управление давлением и взрывобезопасность, для предотвращения разрыва контейнера.

Можно предположить, что многоуровневая система защиты, интегрированная в специализированный контейнер для транспортировки литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) и сочетающая пассивные и активные методы подавления пожара, будет значительно эффективнее существующих решений [17] для локализации теплового разгона и предотвращения его распространения на всю партию груза. Выдвинутая гипотеза требует дальнейшего экспериментального исследования.

Заключение

Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов в том числе при транспортировке является не просто отраслевой проблемой, а серьезным, системным и постоянно растущим вызовом для глобальной безопасности транспортной и логистической системы. Как показывают катастрофические происшествия на судах *Felicity Ace* и *MV Freemantle Highway*, а также данные о росте парка электромобилей в России, существующая нормативная база и типовые технические решения не отвечают современным угрозам. Они не учитывают фундаментальную основу горения ЛИА, включающую самоподдерживающийся процесс теплового разгона, поток кислорода при разложении катодного материала. Существующие исследования и разработки в данной области носят фрагментарный характер и требуют комплексного подхода при решении данной научной задачи.

Ключевой выводом проведенного исследования является факт того, что разработка комплексной системы безопасности перевозки ЛИА, основанной на специализированных пожаробезопасных контейнерах, является не только предметом научного интереса или коммерческих инициатив, а неотложной, необходимой мерой, без которой безопасная логистика ЛИА невозможна.

По мнению авторов наиболее перспективным и научно обоснованным подходом является создание многоуровневой системы защиты, интегрированной непосредственно в транспортный контейнер, которая включает в себя:

1. Фундаментальный блок пассивной огнезащиты включающий специализированный пожаробезопасный контейнер, ограничивающий распространения горения за пределы очага.
2. Активный блок, включающий специализированные огнетушащие вещества и составы.
3. Блок контроля среды, включающий клапаны с пламегасителями и фильтрами необходимы для безопасного сброса газа, образующегося на начальных стадиях теплового разгона, без выброса пламени за пределы окружающей среды.

В дальнейших исследованиях предполагается проведение серии экспериментов, направленных на верификацию выдвинутых в настоящей статье положений.

Список источников

1. Плотников В.Г., Чешко И.Д., Кондратьев С.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов и низковольтных источников питания на их основе // Расследование пожаров. – 2014. – С. 53-58.
2. Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В. Анализ пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2020. – №. 3. – С. 14-17.
3. Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В. Основные факторы, провоцирующие пожарную опасность литий-ионных аккумуляторов // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 5. – С. 34-42.
4. Двоенко О.В., [и др.] Основные положения о пожарной опасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Огнезащитная эффективность покрытий металлических строительных конструкций при ускоренном климатическом старении: сборник научных трудов. – 2021. – С. 34-38.
5. Терентьев Д.И., [и др.] Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов // Пожарная безопасность. – 2022. – № 4. – С. 25-29.
6. Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность. – 2022. – Т. 31. – № 3. – С. 96-102.
7. Пехотиков В.А., [и др.] Анализ нормативных требований в области обеспечения пожарной безопасности литий-ионных аккумуляторных батарей // Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XIV Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 487-493.
8. Саклантй А.Р., [и др.] О пожарной опасности литий-ионных аккумуляторов // Теория и практика судебной экспертизы. – 2025. – Т. 20. – № 1. – С. 74-85.
9. Харламенков А.С. Современные способы тушения литий-ионных аккумуляторов. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность. – 2023. – Т. 32. – № 1. – С. 89-96.
10. IEC 62619:2022 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes — Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications. – Ed. 2.0. – 2022. – 147 p.
11. ГОСТ Р МЭК 61960-2007. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неподкисленные электролиты. Аккумуляторы литиевые и литий-ионные для портативного применения // ГОСТ Р МЭК 61960-2007. Аккумуляторы и аккумуляторные батареи, содержащие щелочной и другие неподкисленные электролиты. Аккумуляторы литиевые и литий-ионные для портативного применения [Электронный ресурс]. - Введ. 2009-01-01. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200065291> (дата обращения: 08.07.2025).
12. Chen M. et al. Experimental study on the combustion characteristics of primary lithium batteries fire // Fire Technology. – 2016. – Т. 52. – №. 2. – С. 365-385.
13. Park S.G, Kim S.W, Lee E.Ju Experimental study on fire characteristics of lithium-ion battery using cone calorimeter // Fire Science and Engineering. – 2021. – Т. 35. – №. 3. – С. 1-6.
14. ГОСТ Р МЭК 60086-4-2021. Источники тока химические. Часть 4. Безопасность литиевых батарей [Электронный ресурс]. — Введ. 2022-07-01. — Режим доступа: https://rosgos.ru/file/gost/29/220/gost_r_mek_60086-4-2021.pdf (дата обращения: 08.07.2025).
15. ГОСТ 12.2.007.12-88. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Требования безопасности [Электронный ресурс]. — Введ. 1989-01-01. — Режим доступа: <https://gosgroup.ru/Gost/%C3%CE%D1%D2%2012.2.007.12-88.pdf> (дата обращения: 08.07.2025).
16. Постановление Правительства РФ от 21.12.2020 № 2200 (ред. от 27.05.2025) «Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом и о внесении изменений в пункт 2.1.1 Правил дорожного движения Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс: [сайт]. — Режим доступа:

https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371981/6df33f3542074be62ebd59d8ebcabd38cd3159cb/ (дата обращения: 08.07.2025).

17. Alexeev S. G. et al. Контейнер-чехол для хранения и транспортировки литий-ионных аккумуляторов // Научно-методический и информационный журнал. – 2020. – Т. 2. – С. 154.

References

1. Plotnikov V.G., Cheshko I.D., Kondratyev S.A. Fire Hazard of Lithium-Ion Batteries and Low-Voltage Power Supplies Based on Them // Fire Investigation. – 2014. – pp. 53-58.
2. Eliseev Yu.N., Mokryak A.V. Analysis of Fire Hazard of Lithium-Ion Batteries // Scientific and Analytical Journal "Bulletin of the Saint Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia". – 2020. – No. 3. – pp. 14-17.
3. Eliseev Yu.N., Mokryak A.V. Main Factors Provoking Fire Hazard of Lithium-Ion Batteries // Fire and Explosion Safety. – 2021. – Vol. 30, No. 5. – pp. 34–42.
4. Dvoenko O.V., [et al.] Main Provisions on the Fire Hazard of Lithium-Ion Batteries // Fire Retardant Effectiveness of Coatings for Metal Building Structures under Accelerated Climate Aging: collection of scientific papers. — 2021. — pp. 34-38.
5. Terentyev D.I., [et al.] Preliminary Study of Fire Hazard Properties of Lithium-Ion Batteries // Fire Safety. — 2022. — No. 4. — pp. 25-29.
6. Kharlamenkov A.S. Fire Hazard of Using Lithium-Ion Batteries in Russia // Fire and Explosion Safety. — 2022. — Vol. 31. — No. 3. — pp. 96-102.
7. Pekhotikov V.A., [et al.] Analysis of Regulatory Requirements in the Field of Ensuring Fire Safety of Lithium-Ion Batteries // Actual Problems of Fire Safety: proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference. — 2020. — pp. 487-493.
8. Saklanty A.R., [et al.] On the Fire Hazard of Lithium-Ion Batteries // Theory and Practice of Forensic Examination. — 2025. — Vol. 20. — No. 1. — pp. 74-85.
9. Kharlamenkov A.S. Modern Methods of Extinguishing Lithium-Ion Batteries. Part 1 // Fire and Explosion Safety. — 2023. — Vol. 32. — No. 1. — pp. 89-96.
10. IEC 62619:2022 Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes — Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications. – Ed. 2.0. – 2022. – 147 p.
11. GOST R IEC 61960-2007. Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Lithium and lithium-ion batteries for portable applications [Electronic resource]. - Introduced 2009-01-01. - Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/1200065291> (accessed: 08.07.2025).
12. Chen M. et al. Experimental study on the combustion characteristics of primary lithium batteries fire // Fire Technology. – 2016. – Vol. 52. – No. 2. – pp. 365-385.
13. Park S.G, Kim S.W, Lee E.Ju Experimental study on fire characteristics of lithium-ion battery using cone calorimeter // Fire Science and Engineering. – 2021. – Vol. 35. – No. 3. – pp. 1-6.
14. GOST R IEC 60086-4-2021. Primary batteries. Part 4. Safety of lithium batteries [Electronic resource]. — Introduced 2022-07-01. — Access mode: https://rosogosts.ru/file/gost/29/220/gost_r_mek_60086-4-2021.pdf (accessed: 08.07.2025).
15. GOST 12.2.007.12-88. Occupational safety standards system. Electrical products. Safety requirements [Electronic resource]. — Introduced 1989-01-01. — Access mode: <https://gosgroup.ru/Gost/%C3%CE%D1%D2%2012.2.007.12-88.pdf> (accessed: 08.07.2025).
16. Decree of the Government of the Russian Federation of December 21, 2020 No. 2200 (as amended on May 27, 2025) "On Approval of the Rules for the Transportation of Goods by Road and on Amending Clause 2.1.1 of the Traffic Rules of the Russian Federation" [Electronic resource] // ConsultantPlus: [website]. — Access mode: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371981/6df33f3542074be62ebd59d8ebcabd38cd3159cb/ (accessed: 08.07.2025).
17. Alexeev S.G. et al. Container-Case for Storage and Transportation of Lithium-Ion Batteries // Scientific, Methodological and Information Journal. – 2020. – Vol. 2. – P. 154.

Информация об авторах

Т.П. Макарова – кандидат технических наук

Н.В. Мартинович – кандидат технических наук

А.Н. Батуро – кандидат технических наук, доцент

Information about the author

T.P. Makarova – Ph.D. of Engineering Sciences

N.V. Martinovich – Ph.D. of Engineering Sciences

A.N. Baturo - Ph.D. of Engineering Sciences, associate professor

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 20.07.2025, одобрена после рецензирования 27.08.2025, принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 20.07.2025, approved after reviewing 27.08.2025, accepted for publication 01.09.2025.