

---

Научная статья

УДК 621.355

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51

## МАГНИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ВЫЗОВЫ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

А.А. Леонов<sup>1</sup>, Н.В. Трофимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** К новым типам энергоносителей относятся магний-ионные аккумуляторы, которые представляют собой потенциально более эффективную и экологически безопасную альтернативу существующим аккумуляторным технологиям. Рассмотрены основные разновидности анодных, катодных и электролитных материалов для магний-ионных аккумуляторов, обеспечивающих эффективную транспортировку катионов  $Mg^{2+}$  и возможную циклическую долговечность. Проанализированы преимущества и недостатки данной технологии, а также ее потенциал для применения в различных областях.

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, аккумулятор, анод, электролит, катод

**Для цитирования:** Леонов А.А., Трофимов Н.В. Магний-ионные аккумуляторы: перспективы и вызовы в области энергетики // Труды ВИАМ. 2024. № 3 (133). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.

Scientific article

## MAGNESIUM ION BATTERIES: PROSPECTS AND CHALLENGES IN THE FIELD OF ENERGY

A.A. Leonov<sup>1</sup>, N.V. Trofimov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** New type of the energy carrier include magnesium-ion batteries, which represents potentially more effective and ecologically safe alternative to existing storage technologies. The main types of anode, cathode and electrolyte materials for magnesium-ion batteries, ensuring efficient transfer of  $Mg^{2+}$  cations and possible cyclic durability, are considered. In the article advantages and disadvantages of this technology, its potential for application in different areas also are analyzed.

**Keywords:** magnesium alloys, battery, anode, electrolyte, cathode

**For citation:** Leonov A.A., Trofimov N.V. Magnesium ion batteries: prospects and challenges in the field of energy. *Trudy VIAM*, 2024, no. 3 (133), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-3-41-51.

### Введение

Современное развитие энергетической отрасли требует постоянного совершенствования и разработки новых энергоносителей, отличающихся высокой энергоемкостью, длительным сроком службы, экологической и эксплуатационной безопасностью. В последние десятилетия аккумуляторы на основе лития стали широко применяться в различных областях, в частности для производства электромобилей, портативных электронных устройств и энергетических систем. Поэтапная электрификация, обеспечивающая снижение уровня выбросов токсичных веществ и улучшение экологической устойчивости, затрагивает интересы авиационной отрасли. При этом возможны как полноценная электрификация транспортного средства, так и внедрение гибридных методов, основанных на совместном использовании традиционных двигателей и электрических установок [1–4].

В настоящее время полностью электрические транспортные средства предназначены в основном для малой авиации, что связано с ограниченной дальностью полета и меньшей грузоподъемностью в сравнении с традиционными авиационными суднами. Кроме того, малая авиация – гибкая и инновационная сфера, в которой новые технологии внедряются достаточно легко.

Идея гибридных самолетов заключается в комбинировании преимуществ электрической технологии, таких как низкие уровни выбросов и более эффективное использование топлива, и привычной системы традиционных двигателей, обеспечивающих необходимую мощность для полета на большие расстояния. Типичная конфигурация гибридного самолета включает электрический двигатель, который используется для малых скоростей, набора высоты при взлете и для посадки. Для полетов на большие расстояния применяется традиционный двигатель внутреннего сгорания, работающий на авиационном топливе. Такая гибридная конфигурация позволяет более гибко использовать энергию, что может привести к увеличению дальности полета, а также снижению потребления топлива и уровня выбросов вредных веществ в атмосферу [5–9].

За рубежом многие авиационные компании (Joby Aviation, Bell Helicopter, Zunum Aero, Archer Aviation, Ampaire (США); Lilium, E-Volo (Германия) и др.) активно разрабатывают и испытывают электрические самолеты, в том числе вертикального взлета и посадки (рис. 1), которые имеют перспективы для практической реализации и дальнейшего внедрения. Например, компания MagniX (Сингапур) в 2022 г. успешно завершила первый испытательный полет электрического самолета Alice (рис. 1, ж), оснащенного двумя электрическими силовыми установками Magni650. Китайская компания China Aviation Industry General Aircraft начала испытания электрического самолета AG60E (рис. 1, з).

В качестве основных устройств хранения энергии в электрических транспортных средствах используются литий-ионные аккумуляторы, которые, несмотря на большую энергоемкость, имеют такие недостатки, как высокая стоимость, ограниченный ресурс и проблемы с безопасностью. В связи с этим в последние годы исследователи всего мира обратили внимание на разработку альтернативных аккумуляторных систем с более доступными и экологически безопасными материалами, к которым в том числе относятся магний и его сплавы [10–14].

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

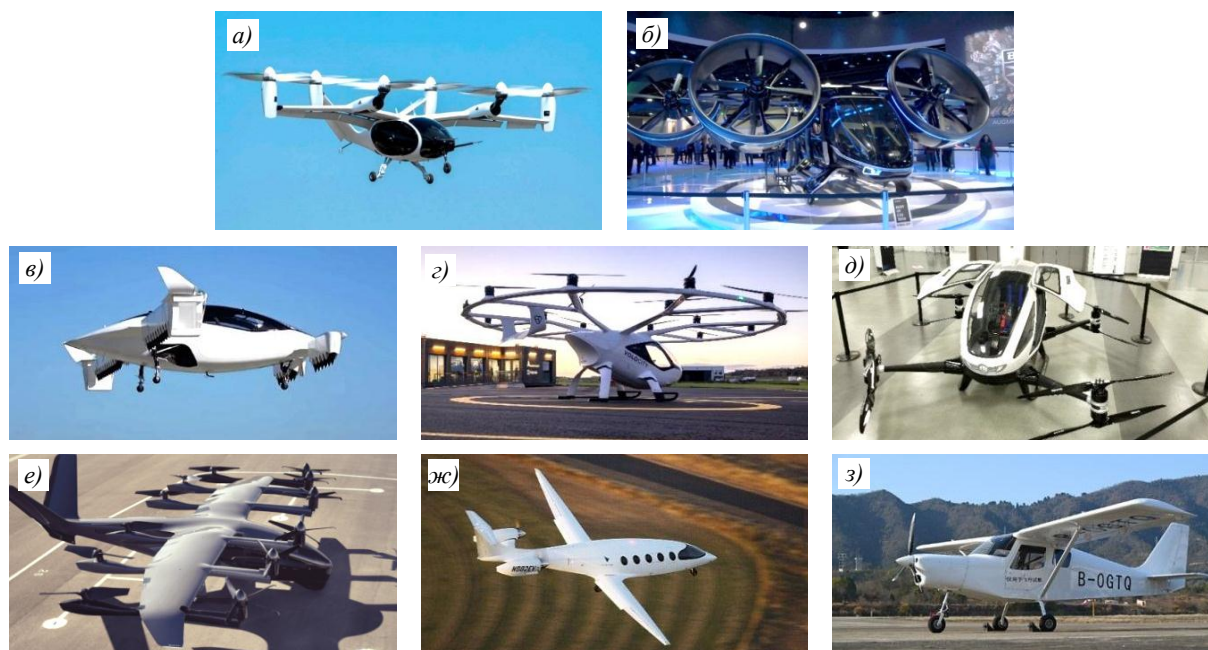


Рис. 1. Электрический самолет Joby, США (а); гибридно-электрический самолет Bell Nexus, США (б); электрический реактивный самолет Lilium Jet, Германия (в); электрический пилотируемый вертолет-мультикоптер сверхлегкого класса Volocopter, Германия (г); автономный пассажирский беспилотный летательный аппарат Ehang 184, Китай (д); пятиместный электрический самолет Midnight, США (е); электрический самолет Alice, оснащенный двумя электрическими силовыми установками Magni650, Сингапур (ж); электрифицированная модификация двухместного самолета AG60, Китай (з)

### Обсуждение опубликованных результатов

В магний-ионных аккумуляторах магний и его ионы ( $Mg^{2+}$ ) играют роль активных материалов для хранения и высвобождения электрической энергии. Конструктивно аккумулятор можно рассматривать как электрохимическую ячейку, состоящую из двух электродов и электролита. Электрод первого типа принято называть анодом, а электрод второго типа – катодом. Материал на основе магния в данном случае используется в качестве анода (рис. 2) [15–17].

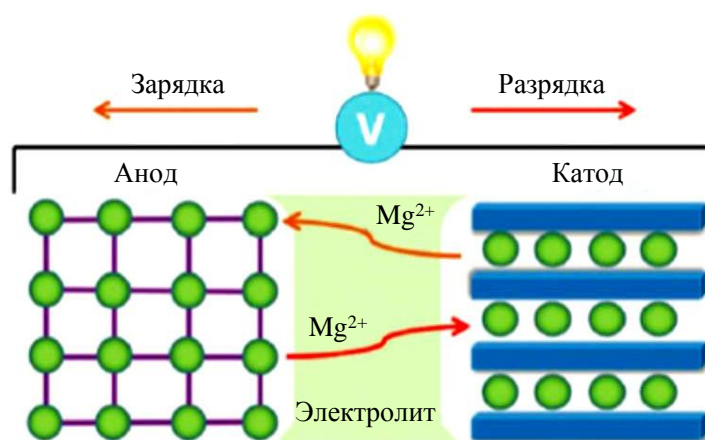


Рис. 2. Принципиальная схема работы магний-ионного аккумулятора [18]

В электрохимической ячейке носителями тока являются ионы и электроны. Возбудителем движения ионов и источником электронов является электрохимическая реакция, протекающая на границе раздела с участием носителей тока из обеих фаз. При этом реакции, протекающие на аноде, называют анодными, на катоде – катодными [16]. Принцип зарядки магний-ионного аккумулятора основан на переносе магниевых ионов между двумя электродами – анодом и катодом. При зарядке происходит поглощение электронов на аноде, что приводит к окислению магния и образованию ионов  $Mg^{2+}$ , которые перемещаются через электролит к катоду, где они редуцируются, возвращая электроны и образуя нейтральный магний.

Теоретическая емкость заряда ионов  $Mg^{2+}$  в  $\sim 2$  раза превышает значение аналогичной характеристики ионов  $Li^+$ . Это свидетельствует о потенциальной возможности уменьшения размеров аккумулятора на основе магния или увеличения его емкости в  $\sim 2$  раза при сохранении того же объема. При этом стандартный электродный потенциал магния составляет  $-2,37$  В (рис. 3), что позволяет добиться высокой мощности. Кроме того, магний является одним из самых распространенных элементов земной коры ( $\sim 2,3$  % против  $0,002$  % для лития), что положительно сказывается на стоимости устройств хранения энергии на его основе [19, 20].

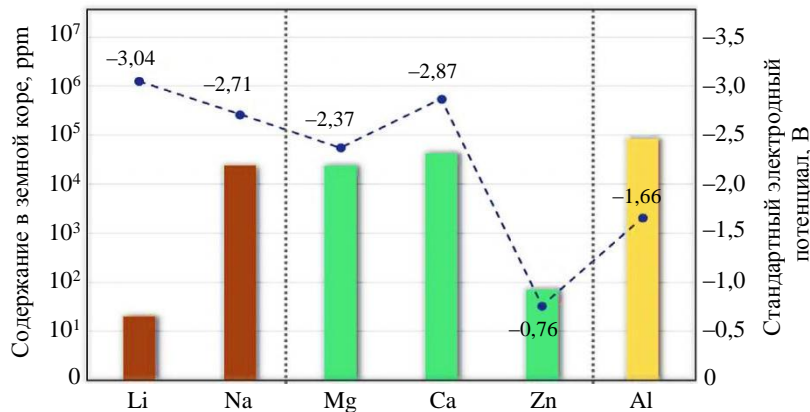


Рис 3. Распространенность в земной коре и стандартный электродный потенциал (---) элементов [19]

В качестве анода исследователи рассматривают различные источники, начиная с чистого металлического магния и сплавов на его основе и заканчивая углеродными материалами. Магнийевый анод наравне с электролитом на основе солей магния является источником ионов  $Mg^{2+}$ , однако при взаимодействии с некоторыми электролитами, в частности содержащими воду, на его поверхности формируется пассивирующий слой, ухудшающий анодную эффективность и разрядную активность. Это также приводит к коррозии магниевого анода. Одним из эффективных способов улучшения характеристик анода на основе магния является легирование. Так, использование в качестве анодов магниевых сплавов системы Mg–Al–Zn благоприятно влияет на анодную эффективность, напряжение и коррозионные характеристики, снижая уровень разрушения анода при циклических испытаниях «заряд/разряд». При этом бинарные композиции магния с редкоземельными элементами обеспечивают более высокую плотность мощности и гораздо более высокую стабильность как при непрерывном, так и при прерывистом разряде [21, 22].

При использовании углеродного материала в качестве анода магний присутствует в электролите и служит источником ионов  $Mg^{2+}$ , перемещающихся между анодом и

катодом. Одним из самых распространенных углеродных материалов является графит, который обладает высокой электропроводностью, стабильностью и способностью взаимодействовать с ионами магния [23–25]. Кроме графита изучают другие углеродные материалы, например аморфный углерод в виде углеродных нанотрубок или нановолокон, которые обладают способностью к быстрой ионной диффузии и увеличивают производительность аккумулятора [13].

Одним из ключевых компонентов магниевых аккумуляторов является электролит, который обеспечивает движение ионов  $Mg^{2+}$ , а также разделяет анод и катод, предотвращая их прямой контакт и обеспечивая стабильную работу.

В последние годы предпринято много усилий для разработки электролитов с высокой проводимостью, химической стабильностью и низким негативным воздействием на электроды аккумулятора. Проводимые исследования позволили разделить электролиты на основные группы: жидкие, на основе полимеров, неорганические твердотельные [10, 14, 19].

К жидким электролитам можно отнести солевые аналоги литий-ионных аккумуляторов, соли на основе магния, ионные растворители/добавки.

Электролиты, используемые в литий-ионных аккумуляторах, не нашли применения в магниевых аккумуляторах без значительной доработки. Это обусловлено образованием пассивирующего слоя (рис. 4) на границе раздела «магний–электролит», который препятствует проникновению ионов  $Mg^{2+}$ , и необходимостью его разрушения в процессе каждого цикла зарядки/разрядки с целью обеспечения цикличности. В то время как в литий-ионных аккумуляторах образующийся слой проницаем для ионов  $Li^+$ .

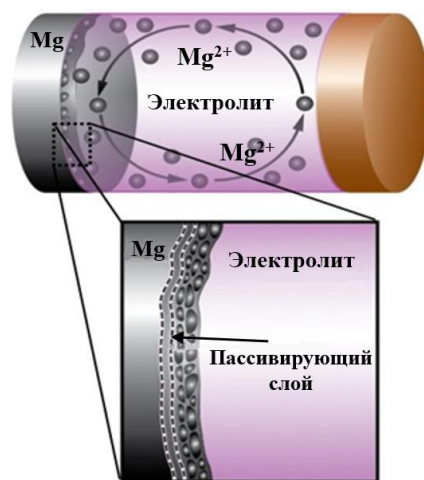


Рис. 4. Пассивирующий слой, препятствующий проникновению ионов  $Mg^{2+}$

К солям на основе магния относятся соли, состоящие из отдельных ионов магния и соответствующих анионов, специально подобранных для оптимальных электрохимических свойств и совместимости с электродами. Они играют ключевую роль в формировании структур электролита, обеспечении высокой электропроводности и могут способствовать снижению риска образования побочных реакций, таких как пассивация электродов и коррозия. Преимуществами таких электролитов являются высокая электропроводность, химическая стабильность, широкий диапазон работы. При подборе такого рода электролитов следует учитывать, что некоторые соли могут иметь ограниченную растворимость, высокую вязкость и стоимость, а также склонность к пассивации анодной и катодной поверхности [19, 26].

Ионные жидкости могут служить негорючими растворителями для растворения катионов солей и источником катионов/анионов. Это преимущество особенно полезно для электролитов на основе магния, поскольку простые соли и обычные растворители пассивируют их поверхность. Однако при их использовании необходимо обеспечить достаточную восстановительную стабильность по отношению к металлическому магнию [10, 14, 27].

Полимерные электролиты представляют собой одну из альтернатив классическим жидким электролитам и используются в качестве среды для обеспечения ионной проводимости и физического разделения электродов. Главными преимуществами полимерных электролитов являются безопасность за счет высокой степени химической и термической стабильности, а также низкая вязкость, способствующая лучшей мобильности ионов  $Mg^{2+}$ . Однако полимерные материалы могут иметь более низкую электропроводность в сравнении с другими типами электролитов, их производство является сложным процессом [19, 16, 27].

С точки зрения ограниченной реакционной способности и устойчивости к магниевым анодам ввиду исключения образования ионно-блокирующего слоя при контакте электродов твердотельные электролиты можно считать наиболее перспективным вариантом применительно к магниевым ионным аккумуляторам (рис. 5).

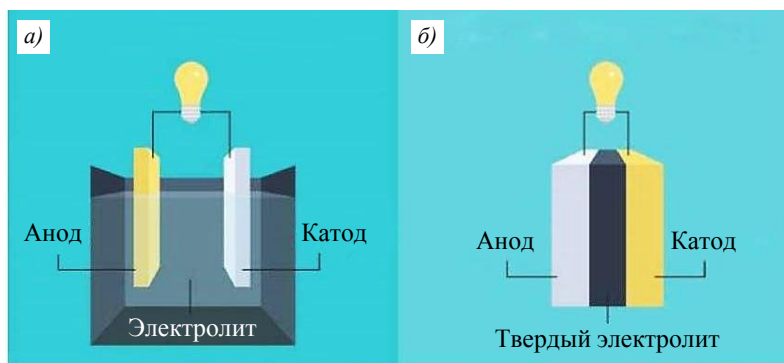


Рис. 5. Сравнительная схема обычного (а) и твердотельного (б) аккумуляторов

Твердотельные электролиты обычно обладают высокой электрохимической, химической и термической стабильностью, что делает их более безопасными при эксплуатации, обеспечивает устойчивость при более высоких потенциалах и способность к стабильной работе в широком диапазоне напряжений. Например, проводятся исследования по использованию борогидрида магния  $Mg(BH_4)_2$  [28], стеклокерамических твердых электролитов  $MgS-P_2S_5-MgI_2$  [29],  $Mg_{0,5}Si_2(PO_4)_3$  [30],  $MgZr_4(PO_4)_6$  [31], шпинели  $MgX_2Z_4$  (где  $X - N, Y, Sc$ ;  $Z - S, Se, Te$ ) [32], которые подтвердили перспективность данного направления. Однако необходимо учитывать возможные сложности с обеспечением цикличности работы аккумулятора и ионной миграцией, которые связаны с сопротивлением движению ионов  $Mg^{2+}$  внутри кристаллической решетки.

Третьим ключевым компонентом магниевых ионных аккумуляторов является катод. В традиционных литий-ионных аккумуляторах применяются различные катодные материалы, такие как оксиды лития, шпинели или смешанные оксидно-фосфатные соединения, например кобальтат лития ( $LiCoO_2$ ) и твердые растворы на основе изоструктурного ему никелата лития; литий-марганцевая шпинель ( $LiMn_2O_4$ ) и феррофосфат лития ( $LiFePO_4$ ). Эти материалы обеспечивают высокую энергетическую плотность, длительное время работы, необходимую стабильность, однако по ряду причин их использование

для магний-ионных аккумуляторов нецелесообразно. Одна из основных причин связана с разной структурой ионов лития и магния. Ионы лития обладают меньшей плотностью заряда по сравнению с ионами магния, что позволяет им эффективно встраиваться в катодный материал и выстраивать стабильную структуру. В то время как ионам  $Mg^{2+}$  сложнее проходить через кристаллическую решетку, что может приводить к большому сопротивлению и низкой стабильности при циклической зарядке/разрядке. Кроме того, следует учитывать различие в электрохимических потенциалах магния и лития, напрямую влияющих на обеспечение более высокого напряжения, которое может быть получено в аккумуляторе при работе. Между тем достигаемое высокое напряжение является весомым преимуществом, поскольку позволяет аккумулятору преобразовывать и хранить большое количество энергии, что определяет длительное время работы на одной зарядке [18, 33, 34].

В процессе химических и электрохимических реакций катод подвергается нежелательным изменениям, которые напрямую влияют на производительность аккумулятора. Использование магния и его солей в качестве анодного материала и электролита приводит к образованию оксида магния ( $MgO$ ) на поверхности катода. Образующийся слой влияет на работу аккумулятора и может привести к изменению характера электродной реакции. Очень толстый слой оксида может стать препятствием для электронного и ионного транспорта между активным катодным материалом и электролитом, что приводит к увеличению электрического сопротивления и снижению эффективности работы аккумулятора. Как правило, оксид магния не обладает высокой электрохимической активностью. Находясь на поверхности катода, он может снизить электрическую емкость, определяющую количество электрического заряда, который хранит и вырабатывает аккумулятор при работе [35–37].

### Заключения

Магний-ионные аккумуляторы представляют собой перспективное направление в развитии современных аккумуляторных технологий. Несмотря на активное применение литий-ионных источников хранения энергии, их потенциал ограничен, в частности, высокой стоимостью, недостаточной распространенностью лития в природе, неустойчивостью к механическим и температурным воздействиям. Магний-ионные аккумуляторы, в свою очередь, имеют несколько преимуществ, которые делают их перспективными для диверсификации источников энергии.

Во-первых, высокая теоретическая емкость магния значительно превышает значение аналогичной характеристики лития, что позволит хранить больше энергии, добиться увеличения пройденного транспортным средством расстояния и обеспечит возможность уменьшения массы и размера аккумулятора. Это положительно скажется на весовой эффективности и повышении тактико-технических характеристик изделий.

Во-вторых, магний – один из самых распространенных элементов, что делает его дешевым и доступным материалом для использования в аккумуляторах. В отличие от лития, который является дорогим и ограниченно распространенным элементом, магний можно добывать и использовать в больших объемах, что, соответственно, снижает стоимость конечного изделия.

В-третьих, магний-ионные аккумуляторы имеют более длительный срок службы (>1000 циклов против 300–500 циклов для литий-ионных аккумуляторов), что особенно важно для изделий, в которых долговечность батареи является критическим фактором.

Таким образом, использование магния снижает стоимость производства аккумуляторов и делает их более доступными для массового потребителя. Высокая энергетическая плотность магния позволяет создавать аккумуляторы с большей емкостью и длительным сроком службы.

Отмечено, что любые анодные, катодные и электролитные материалы имеют преимущества и недостатки, что требует дальнейшего их изучения с целью подбора оптимальных композиций и повышения эффективности, производительности, стабильности и безопасности аккумуляторов.

#### Список источников

1. Zhang J., Roumeliotis I., Zhang X., Zolotas A. Techno-economic-environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 175. P. 442–464.
2. Emmanouil K. Reliability in the era of electrification in aviation: A systems approach // *Microelectronics Reliability*. 2020. Vol. 114. P. 77–82.
3. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС – ВИАМ, 2002. С. 23–47.*
4. Каблов Е.Н. *Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10–15.*
5. Salem K.A., Polaia G., Quarta A.A. Review of hybrid-electric aircraft technologies and designs: Critical analysis and novel solutions // *Progress in Aerospace Sciences*. 2023. Vol. 141. P. 89–113.
6. Liu Yu., Song Yu., Gao Z., Li L. Analysis of the immersion cooling of electric motors for hybrid aircraft // *Progress Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 178. P. 404–416.
7. Gimenez F.R., Keutenedjian Mady C.E., Henriques I.B. Assessment of different more-electric and hybrid-electric configurations for long-range multi-engine aircraft // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 392. P. 321–338.
8. Sziroczak D., Jankovics I., Gal I., Rohacs D. Conceptual design of small aircraft with hybrid-electric propulsion system // *Energy*. 2020. Vol. 204. P. 289–329.
9. Park J., Lee D., Lim D., Yee K. A refined sizing method of fuel cell-battery hybrid system for eVTOL aircraft // *Applied Energy*. 2022. Vol. 328. P. 232–249.
10. Xu R., Gao X., Chen Ya et al. Research advances of the electrolytes for rechargeable magnesium ion batteries // *Materials Today Physics*. 2023. No. 36. P. 116–133.
11. Li R., Zhang R., Liu Q. et al. Bifunctional non-nucleophilic electrolyte enables long-life magnesium batteries via elimination of passive film on Mg anode // *Chemical Engineering Journal*. 2023. No. 462. P. 67–81.
12. Moselhy M.A., Farrag M., Zhu Y., Sheha E. Probing the effect of ethylene carbonate on optimizing the halogen-free electrolyte performance for Mg sulfur batteries // *Royal Society of Chemistry*. 2023. No. 13. P. 228–232.
13. Rashad M., Asif M., Ahmed I. et al. Quest for carbon and vanadium oxide based rechargeable magnesium-ion batteries // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 8. P. 364–373.
14. Dominko R., Bitenc J., Berthelot R. et al. Magnesium batteries: Current picture and missing pieces of the puzzle // *Journal of Power Sources*. 2020. No. 478. P. 321–339.
15. Каблов Е.Н. *Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.*
16. Багоцкий В.С. *Основы электрохимии. М.: Химия, 1988. 400 с.*
17. Фомина М.А., Волков И.А., Вдовин А.И., Ямщиков Е.И. Исследование защитной способности анодно-оксидного покрытия с экологически улучшенной технологией наполнения // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
18. Shi M., Li T., Shang H. et al. A critical review of inorganic cathode materials for rechargeable magnesium ion batteries // *Journal of Energy Storage*. 2023. No. 68. P. 216–228.
19. Deivanayagam R., Ingram B.J., Shahbazian-Yassar R. Progress in development of electrolytes for magnesium batteries // *Energy Storage Materials*. 2019. No. 21. P. 136–153
20. Ma B., Ouyang L., Zheng J. Magnesium-rare earth intermetallic compounds for high performance high power aqueous Magnesium-Air batteries // *Journal of Magnesium and Alloys*. 2023. No. 4. P. 76–90. DOI: 10.1016/j.jma.2023.06.010.

21. Lia Q., Xiong W., Yu M. et al. Effect of Ce content on performance of AZ31 magnesium alloy anode in air battery // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 891 (4). P. 132–141. DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.161914.
22. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
23. Miao X., Yang J., Pan W. et al. Graphite fluoride as a cathode material for primary magnesium batteries with high energy density // *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 210. P. 704–711.
24. Giraudet J., Claves D., Guerin K. et al. Magnesium batteries: towards a first use of graphite fluorides // *Journal of Power Sources*. 2007. Vol. 173. Is. 8. P. 595–598.
25. Lee M., Jeong M., Nam Y.S. et al. Nitrogen-doped graphitic mesoporous carbon materials as effective sulfur imbibition hosts for magnesium-sulfur batteries // *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 535. P. 444–462.
26. Mana Y., Jaumaux P., Xu Y. et al. Research development on electrolytes for magnesium-ion batteries // *Science Bulletin*. 2023. No. 68. P. 1819–1842.
27. Das A., Balakrishnan N.T.M., Sreeram P. et al. Prospects for magnesium ion batteries: A comprehensive materials review // *Coordination Chemistry Reviews*. 2024. Vol. 502. P. 118–129.
28. Higashi S., Miwa K., Aoki M., Takechi K. A novel inorganic solid-state ion conductor for rechargeable Mg batteries // *ChemCommun*. 2014. No. 50. P. 1320–1322. DOI: 10.1039/c3cc47097k.
29. Yamanaka T., Hayashi A., Yamauchi A., Tatsumisago M. Preparation of magnesium ion conducting  $\text{MgS-P}_2\text{S}_5\text{-MgI}_2$  glasses by a mechanochemical technique // *Solid State Ionics*. 2014. No. 262. P. 601–603. DOI: 10.1016/j.ssi.2013.10.037.
30. Halim Z.A., Adnan S.B.R.S., Mohamed N.S. Effect of sintering temperature on the structural, electrical and electrochemical properties of novel  $\text{Mg}_{0.5}\text{Si}_2(\text{PO}_4)_3$  ceramic electrolytes // *Ceramics International*. 2016. No. 42. P. 4452–4461.
31. Ikeda S., Takahashi M., Ishikawa J., Ito K. Solid electrolytes with multivalent cation conduction: 1. Conducting species in Mg–Zr– $\text{PO}_4$  system // *Solid State Ionics*. 1987. No. 23. P. 125–129.
32. Canepa P., Bo S.H., Sai Gautam G. et al. High magnesium mobility in ternary spinel chalcogenides // *Nature Communications*. 2017. No. 8. P. 1759. DOI: 10.1038/s41467-017-01772-1.
33. Kotobuki M., Yan B., Lu L. Recent progress on cathode materials for rechargeable magnesium batteries // *Energy Storage Materials*. 2023. Vol. 54. P. 227–253.
34. Воронов В.А., Чайникова А.С., Ткаленко Д.М. Особенности использования органических или водных связующих на основе оксидов элементов III или IV групп при изготовлении керамических форм для литья отливок из химически активных сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 2 (63). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 22.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-73-84.
35. Zhang X., Li D., Ruan Q. et al. Vanadium-based cathode materials for rechargeable magnesium batteries // *Materials Today Energy*. 2023. No. 32. P. 169–199.
36. Козлов И.А., Виноградов С.С., Тарасова К.Г., Кулюшина Н.В., Манченко В.А. Плазменное электролитическое окисление магниевых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
37. Chen S., Fan S., Li H. et al. Recent advances in kinetic optimizations of cathode materials for rechargeable magnesium batteries // *Coordination Chemistry Reviews*. 2022. No. 466. P. 4–15.

### References

1. Zhang J., Roumeliotis I., Zhang X., Zolotas A. Techno-economic-environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, vol. 175, pp. 442–464.
2. Emmanouil K. Reliability in the era of electrification in aviation: A systems approach. *Microelectronics Reliability*, 2020, vol. 114, pp. 77–82.

3. Kablov E.N. Aviation materials science in the 21st century. Prospects and objectives. *Aviation materials. Selected works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS – VIAM, 2002, pp. 23–47.
4. Kablov E.N. Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia. *Metally Evrazii*, 2012, no. 3, pp. 10–15.
5. Salem K.A., Polaia G., Quarta A.A. Review of hybrid-electric aircraft technologies and designs: Critical analysis and novel solutions. *Progress in Aerospace Sciences*, 2023, vol. 141, pp. 89–113.
6. Liu Yu., Song Yu., Gao Z., Li L. Analysis of the immersion cooling of electric motors for hybrid aircraft. *Progress Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 178, pp. 404–416.
7. Gimenez F.R., Keutenedjian Mady C.E., Henriques I.B. Assessment of different more-electric and hybrid-electric configurations for long-range multi-engine aircraft. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 392, pp. 321–338.
8. Sziroczak D., Jankovics I., Gal I., Rohacs D. Conceptual design of small aircraft with hybrid-electric propulsion system. *Energy*, 2020, vol. 204, pp. 289–329.
9. Park J., Lee D., Lim D., Yee K. A refined sizing method of fuel cell-battery hybrid system for eVTOL aircraft. *Applied Energy*, 2022, vol. 328, pp. 232–249.
10. Xu R., Gao X., Chen Ya et al. Research advances of the electrolytes for rechargeable magnesium ion batteries. *Materials Today Physics*, 2023, no. 36, pp. 116–133.
11. Li R., Zhang R., Liu Q. et al. Bifunctional non-nucleophilic electrolyte enables long-life magnesium batteries via elimination of passive film on Mg anode. *Chemical Engineering Journal*, 2023, no. 462, pp. 67–81.
12. Moselhy M.A., Farrag M., Zhu Y., Sheha E. Probing the effect of ethylene carbonate on optimizing the halogen-free electrolyte performance for Mg sulfur batteries. *Royal Society of Chemistry*, 2023, no. 13, pp. 228–232.
13. Rashad M., Asif M., Ahmed I. et al. Quest for carbon and vanadium oxide based rechargeable magnesium-ion batteries. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, vol. 8, pp. 364–373.
14. Dominko R., Bitenc J., Berthelot R. et al. Magnesium batteries: Current picture and missing pieces of the puzzle. *Journal of Power Sources*, 2020, no. 478, pp. 321–339.
15. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
16. Bagotsky V.S. *Basics of electrochemistry*. Moscow: Khimiya, 1988, 400 p.
17. Fomina M.A., Volkov I.A., Vdovin A.I., Yamshchikov E.I. Study of protective capacity anodic oxide coating with environmental friendly improved filling technology. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 16, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
18. Shi M., Li T., Shang H. et al. A critical review of inorganic cathode materials for rechargeable magnesium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 2023, no. 68, pp. 216–228.
19. Deivanayagam R., Ingram B.J., Shahbazian-Yassar R. Progress in development of electrolytes for magnesium batteries. *Energy Storage Materials*, 2019, no. 21, pp. 136–153.
20. Ma B., Ouyang L., Zheng J. Magnesium-rare earth intermetallic compounds for high performance high power aqueous Magnesium-Air batteries. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, no. 4, pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.jma.2023.06.010.
21. Lia Q., Xiong W., Yu M. et al. Effect of Ce content on performance of AZ31 magnesium alloy anode in air battery. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, vol. 891 (4), pp. 132–141. DOI:10.1016/j.jallcom.2021.161914.
22. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
23. Miao X., Yang J., Pan W. et al. Graphite fluoride as a cathode material for primary magnesium batteries with high energy density. *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 210, pp. 704–711.
24. Giraudet J., Claves D., Guerin K. et al. Magnesium batteries: towards a first use of graphite fluorides. *Journal of Power Sources*, 2007, vol. 173, is. 8, pp. 595–598.

25. Lee M., Jeong M., Nam Y.S. et al. Nitrogen-doped graphitic mesoporous carbon materials as effective sulfur imbibition hosts for magnesium-sulfur batteries. *Journal of Power Sources*, 2022, vol. 535, pp. 444–462.
26. Mana Y., Jaumaux P., Xu Y. et al. Research development on electrolytes for magnesium-ion batteries. *Science Bulletin*, 2023, no. 68, pp. 1819–1842.
27. Das A., Balakrishnan N.T.M., Sreeram P. et al. Prospects for magnesium ion batteries: A comprehensive materials review. *Coordination Chemistry Reviews*, 2024, vol. 502, pp. 118–129.
28. Higashi S., Miwa K., Aoki M., Takechi K. A novel inorganic solid-state ion conductor for rechargeable Mg batteries. *ChemCommun*, 2014, no. 50, pp. 1320–1322. DOI: 10.1039/c3cc47097k.
29. Yamanaka T., Hayashi A., Yamauchi A., Tatsumisago M. Preparation of magnesium ion conducting MgS–P<sub>2</sub>S<sub>5</sub>–MgI<sub>2</sub> glasses by a mechanochemical technique. *Solid State Ionics*, 2014, no. 262, pp. 601–603. DOI: 10.1016/j.ssi.2013.10.037.
30. Halim Z.A., Adnan S.B.R.S., Mohamed N.S. Effect of sintering temperature on the structural, electrical and electrochemical properties of novel Mg<sub>0.5</sub>Si<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> ceramic electrolytes. *Ceramics International*, 2016, no. 42, pp. 4452–4461.
31. Ikeda S., Takahashi M., Ishikawa J., Ito K. Solid electrolytes with multivalent cation conduction: 1. Conducting species in Mg–Zr–PO<sub>4</sub> system. *Solid State Ionics*, 1987, no. 23, pp. 125–129.
32. Canepa P., Bo S.H., Sai Gautam G. et al. High magnesium mobility in ternary spinel chalcogenides. *Nature Communications*, 2017, no. 8, pp. 1759. DOI: 10.1038/s41467-017-01772-1.
33. Kotobuki M., Yan B., Lu L. Recent progress on cathode materials for rechargeable magnesium batteries. *Energy Storage Materials*, 2023, vol. 54, pp. 227–253.
34. Voronov V.A., Chaynikova A.S., Tkalenko D.M. Aspects of usage of organic or aqueous binders based on III or IV group elements oxides in the production of ceramic molds for chemically active alloys casting (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 22, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-73-84.
35. Zhang X., Li D., Ruan Q. et al. Vanadium-based cathode materials for rechargeable magnesium batteries. *Materials Today Energy*, 2023, no. 32, pp. 169–199.
36. Kozlov I.A., Vinogradov S.S., Tarasova K.G., Kulyushina N.V., Manchenko V.A. Plasma electrolytic oxidation of magnesium alloys (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 23–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-23-36.
37. Chen S., Fan S., Li H. et al. Recent advances in kinetic optimizations of cathode materials for rechargeable magnesium batteries. *Coordination Chemistry Reviews*, 2022, no. 466, pp. 4–15.

#### Информация об авторах

**Леонов Александр Андреевич**, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Трофимов Николай Вадимович**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Alexander A. Leonov**, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nicolay V. Trofimov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 15.03.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.03.2024.

The article was submitted 15.03.2024; approved and accepted for publication after reviewing 18.03.2024.