

Электрохимическая энергетика. 2026. Т. 26, № 2. С. 61–68

*Electrochemical Energetics*, 2026, vol. 26, no. 2, pp. 61–68

<https://energetica.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-2-61-68>, EDN: CRRTHC

Научная статья

УДК 541.136

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА СВОЙСТВА  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОТРУБКАМИ ЭЛЕКТРОДОВ  
ЛИТИЙ-ЖЕЛЕЗО-ФОСФАТНОГО АККУМУЛЯТОРА**

**Е. А. Чудинов, Ю. А. Ермакова, А. В. Иванищев**✉

ООО «РЭНЕРА»

Россия, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 49

**Чудинов Евгений Алексеевич**, доктор технических наук, директор направления химических источников тока, [EvACHudinov@rosatom.ru](mailto:EvACHudinov@rosatom.ru), <https://orcid.org/0009-0001-5113-7221>

**Ермакова Юлия Александровна**, старший научный сотрудник, [YAGroshkova@rosatom.ru](mailto:YAGroshkova@rosatom.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9172-1350>

**Иванищев Александр Викторович**, доктор химических наук, главный научный сотрудник, [AleVIvanishev@rosatom.ru](mailto:AleVIvanishev@rosatom.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9116-4809>

**Аннотация.** Показано, что состав и качество связующего электродов литий-железо-фосфатного аккумулятора оказывают существенное влияние на его работоспособность и ресурс циклирования. Представленные данные подтверждают, что составы связующего на водной основе марки LA132 могут быть использованы в производстве литий-железо-фосфатных аккумуляторов. Установлено, что использование нанотрубок и водного связующего при производстве графитовых анодов и литий-железо-фосфатных катодов позволяет улучшить стабильность, срок службы и удельные характеристики литий-ионных аккумуляторов. При этом себестоимость изготовления батарей снижается по сравнению с традиционными составами связующего.

**Ключевые слова:** водное и неводное связующее, нанотрубки, литий-железо-фосфатный аккумулятор

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность главному эксперту Д. С. Ермакову и руководителю направления электротехнических испытаний А. Е. Дьяченко Центра ХИТ ООО «РЭНЕРА» за помощь в работе, изготовление и испытание образцов литий-железо-фосфатных аккумуляторов.

**Для цитирования:** Чудинов Е. А., Ермакова Ю. А., Иванищев А. В. Исследование влияния водного связующего на свойства модифицированных нанотрубками электродов литий-железо-фосфатного аккумулятора // Электрохимическая энергетика. 2026. Т. 26, № 2. С. 61–68. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-2-61-68>, EDN: CRRTHC

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

**Study of the effect of aqueous binder on the properties of nanotube-modified electrodes of lithium iron phosphate battery**

**E. A. Chudinov, Yu. A. Ermakova, A. V. Ivanishchev**✉

LLC “RENERA”

49 Kashirskoe shosse, 115409 Moscow, Russia

**Evgeniy A. Chudinov**, [EvACHudinov@rosatom.ru](mailto:EvACHudinov@rosatom.ru), <https://orcid.org/0009-0001-5113-7221>

**Yulia A. Ermakova**, [YAGroshkova@rosatom.ru](mailto:YAGroshkova@rosatom.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9172-1350>

**Aleksandr V. Ivanishchev**, [AleVIvanishev@rosatom.ru](mailto:AleVIvanishev@rosatom.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9116-4809>

**Abstract.** It is shown that the composition and the quality of the binder for the electrodes of lithium iron phosphate battery significantly affect its performance and cycle life. The data presented confirm that the LA132-type aqueous binder compositions can be used in the production of lithium iron phosphate batteries. It has been established that the use of nanotubes and an aqueous binder in the production of graphite anodes

and lithium iron phosphate cathodes improves stability, service life, and specific performance of lithium-ion batteries. Moreover, the cost of battery production decreases compared to traditional binder compositions.

**Keywords:** aqueous and non-aqueous binder, nanotubes, lithium iron phosphate battery

**Acknowledgments.** The authors would like to express their our thanks gratitude to the chief expert Dmitry S. Ermakov and the head of the electrical testing department Artem E. Dyachenko of the Center for Chemical Power Sources of RENERA LLC.

**For citation:** Chudinov E. A., Ermakova Yu. A., Ivanishchev A. V. Study of the effect of aqueous binder on the properties of nanotube-modified electrodes of lithium iron phosphate battery. *Electrochemical Energetics*, 2026, vol. 26, no. 2, pp. 61–68 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2026-26-2-61-68>, EDN: CRRTHC

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## ВВЕДЕНИЕ

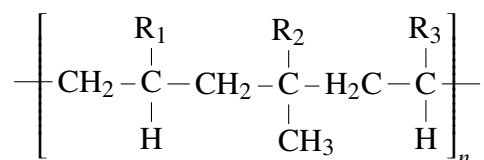
Работоспособность литий-железо-фосфатного аккумулятора [1–3], как и других типов литий-ионных аккумуляторов, зависит от содержания влаги и HF в электролите и электродах. В этой связи применение связующего на водной основе при изготовлении отрицательного электрода [4–6], и особенно положительного электрода, в том числе на основе LiFePO<sub>4</sub> [7, 8], могло показаться не реализуемым. Однако использование водной технологии изготовления электродов на практике не подтвердило опасений повышения содержания влаги в аккумуляторе. В то же время переход на водную технологию связующего позволяет существенно снизить затраты на производство электродов литий-ионного аккумулятора.

Применение углеродных нанотрубок и частиц «твердого углерода» в составе электродов на основе LiFePO<sub>4</sub> повышает их емкость и ресурс циклирования [9–12]. Использование указанных добавок в технологии водного связующего позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики литий-ионных аккумуляторов и одновременно снизить себестоимость их производства, открывая тем самым широкие технологические перспективы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей работе для изготовления электродов применялось связующее на водной основе марки LA132 производства Dian Shi Industries Ltd (Китай). Как известно [13],

полиакриловый латекс LA132 представляет собой три-блок – сополимер акриламида (R1 – акриламид, R2 – карбоновая кислота, R3 – циано-группа):



В макетах литий-железо-фосфатных аккумуляторов применялся электролит состава 1.2 М LiPF<sub>6</sub> в смеси растворителей диметилкарбоната, этилметилкарбоната, этилен-карбоната, винилкарбоната (DMC : EMC : EC : PA : VC) в массовом соотношении (20 : 20 : 30 : 27 : 3) соответственно.

В составе аккумуляторов применялись также следующие материалы: катодный порошок LiFePO<sub>4</sub> марки S19, медная фольга толщиной 9 мкм, токовывод из никелированной меди толщиной 100 мкм, однослойные углеродные нанотрубки ОУНТ SKU, токопроводящая добавка Super P, искусственный графит марки S-360, ламинированная алюминиевая фольга, связующие СМС Gelon, сепаратор Celgard 2500.

По сертификату связующее LA132 обладает следующими характеристиками: вязкость при 40°C ≥ 4800 мПа·с; D50 ≤ 1.2 мкм; содержание сухого вещества: 15.0 ± 0.2 мас.%; pH: 7–9.

В работе использовались следующие методы анализа: ИК-спектроскопия, потенциометрическое титрование, пикнометрия, кулонометрическое титрование по методу Фишера, кондуктометрия, импеданс-

ная спектроскопия, циклическая вольтамперометрия, газожидкостная хроматография, жидкостная хроматография, хромато-масс-спектрометрия, весовой анализ, термогравиметрия, хронопотенциометрия.

Измерения рН исследуемых растворов проводили при 25°C с помощью рН-метра Testo 206 с погружным зондом (Testo AG, Германия).

Для проведения элементного анализа органического компонента, ИК-спектроскопии, исследования термической устойчивости из раствора выделяли полимерный компонент путем сушки на воздухе сначала при температуре (40–50°C) в течение 5–10 мин, а затем 24 ч при комнатной температуре.

Для контроля полноты удаления воды из пленок использовали метод термогравиметрии (комплекса термического анализа STA 449 F1 Jupiter NETZSCH, Германия).

Исследования методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргонной плазмой (ICP-MS) выполняли с помощью квадрупольного масс-спектрометра ELAN 9000 (Perkin Elmer Sciex, США – Канада).

Измерения массовой доли углерода, водорода и азота в пленках полимерного связующего LA132 проводили на автоматическом анализаторе «CHN» модели PE 2400, серия II (Perkin Elmer instruments, США).

Спектроскопические исследования образцов растворов и пленок полимерного связующего проводили с помощью ИК-спектрометра с Фурье-преобразованием Vertex 70v (Bruker, Германия) при 25°C. Съемку спектров растворов полимерного связующего проводили методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) на приставке ATR с алмазным оптическим элементом при 25°C с разрешением  $0.9 \text{ см}^{-1}$  при 32-кратном сканировании.

Определение параметров термического разложения полимерного связующего и установления состава образующихся газообразных продуктов осуществлялось методом синхронного термического анализа с масс-спектрометрией с помощью комплекса термического анализа STA 449 F1 Jupiter

(NETZSCH) и масс-спектрометра QMS 403 C (NETZSCH). Полученные данные были обработаны с помощью программного обеспечения NETZSCH Proteus.

Хроматографический анализ газовой фазы над образцами растворов полимерного связующего LA132, а также хромато-масс-спектрометрический анализ продуктов пиролиза проводились на хромато-масс-спектрометрическом комплексе Varian Saturn 2100T (Нидерланды).

Изготовление лабораторных образцов литий-железо-фосфатных аккумуляторов проводили в соответствии с Технологической инструкцией РСШЛ.25100.050 № 03.1/96-И от 05.12.2024 г. ООО «РЭНЕРА» (секрет производства (ноу-хау)). Все исследования проводились в перчаточных боксах с инертной и контролируемой атмосферой EQ-VGB-6 или Veada Lab2000. Определение воды в электролитах выполняли кулонометрическим титрованием в среде отработанного реактива Фишера на титраторе ТК100-В.

Определение разрядной емкости, кулоновской эффективности и ресурса лабораторных образцов аккумуляторов на основе исследуемых электролитов проводили с помощью анализаторов батарей Neware CT-4008T (B754000-5V50mA) и Neware BTS-4000/CT-4000/4008-5V12A (Neware, Китай), камеры тепла-холода-влаги ВИКАМ-150/2 (Викам, Россия) и вспомогательного модуля регистрации температуры и напряжений Neware Technology CA-4008n-1U-VT-TX (Китай). Внутреннее сопротивление аккумуляторов измеряли прибором GW Instek GBM 73300 (GW Instek, Тайвань).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что исходная вязкость водного связующего LA132, на момент поставки составляла 5200–5500 мПа·с (образец № 1); после 6 месяцев хранения в сухом боксе с инертной атмосферой вязкость повысилась в среднем до 12000–16000 мПа·с (образец № 2), а через год хранения достигла зна-

чения в 45000 мПа·с (образец № 3), что практически на порядок выше величины, указанной в сертификате. Все образцы связующего LA132 имели слабощелочную среду со значениями pH от 7.11 до 7.25.

Результаты термогравиметрии твердого компонента связующего LA132 приведены на рис. 1. Образцы были высушены на воздухе. ТА выполнен в токе аргона. Потеря массы в интервале 80–240°C для образцов № 1 и № 2 составила 6.3–6.5%. Это отвечает равновесному содержанию воды в пленках связующего в воздушной атмосфере. Для образца № 3 потеря массы после сушки на воздухе имела двухступенчатую форму: 4.3% в интервале 70–160°C и 0.4% в интервале 220–250°C, что может быть обусловлено различным характером взаимодействия остаточной воды с компонентами связующего.

Анализ проб связующего LA132 методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной аргоновой плазмой (ICP-MS) показал, что во всех трех образцах растворов полимерного связующего присутствует лишь один неорганический компонент – ионы  $\text{Li}^+$ , а их содержание варьируется от 1.81 до 3.54%.

Результаты измерения массовой доли углерода, водорода и азота в пленках полимерного связующего LA132, полученные на автоматическом анализаторе «CHN» модели PE 2400 (PerkinElmer, США), а также содержания зольного остатка в соответствии с методикой измерения массовой доли углерода и водорода в органических соединениях методом экспресс-гравиметрии после прокаливания при 950°C показали, что данный материал имеет следующий элементный состав, %: C – 59.91–60.12; H – 5.84–6.19; N – 17.87–18.08; Li – 2.86–2.90; зольный остаток – 6.15–6.41.

На основании данных ICP-MS зольный остаток можно отнести к оксиду лития ( $\text{Li}_2\text{O}$ ) (хотя в действительности он может содержать и следы углерода).

ИК-спектры растворов полимерного связующего приведены на рис. 2. Показано, что эти спектры практически идентичны для трех образцов: в них хорошо различима одиночная характеристическая полоса валентных колебаний нитрильных групп  $\text{C}\equiv\text{N}$  ( $2242\text{ см}^{-1}$ ). Помимо этого, в спектрах присутствуют две характеристические полосы при  $1632\text{ см}^{-1}$  (более интенсивная)

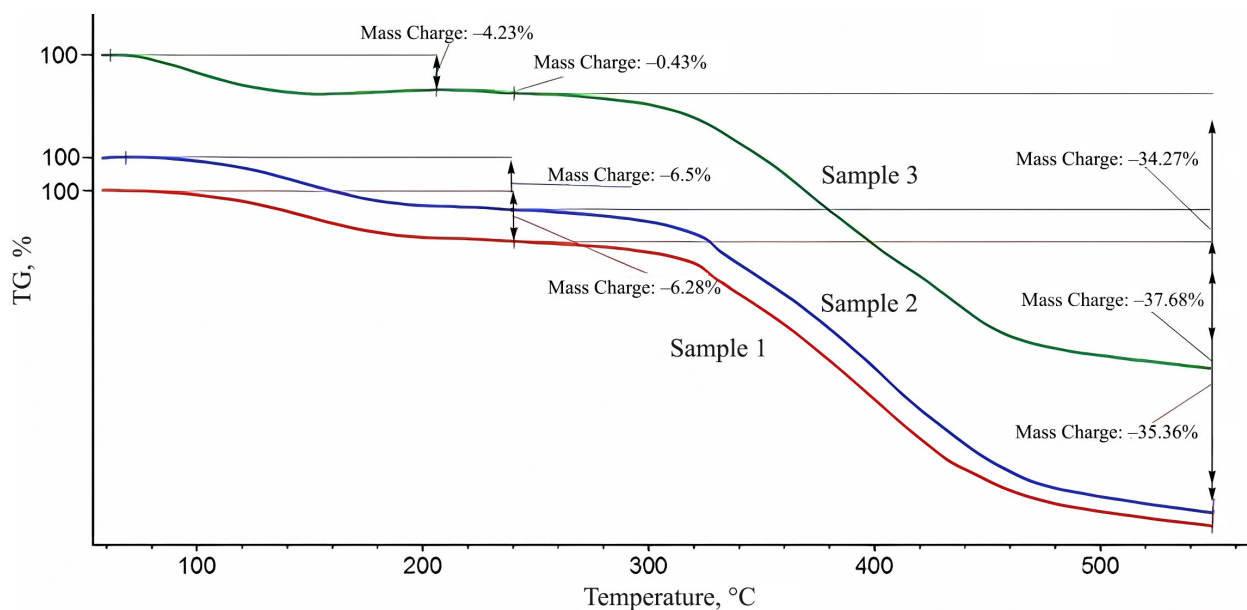


Рис. 1. Кривые TG для пленок LA132, высушенных на воздухе (цвет онлайн)

Fig. 1. TG curves for air dried LA132 films (color online)

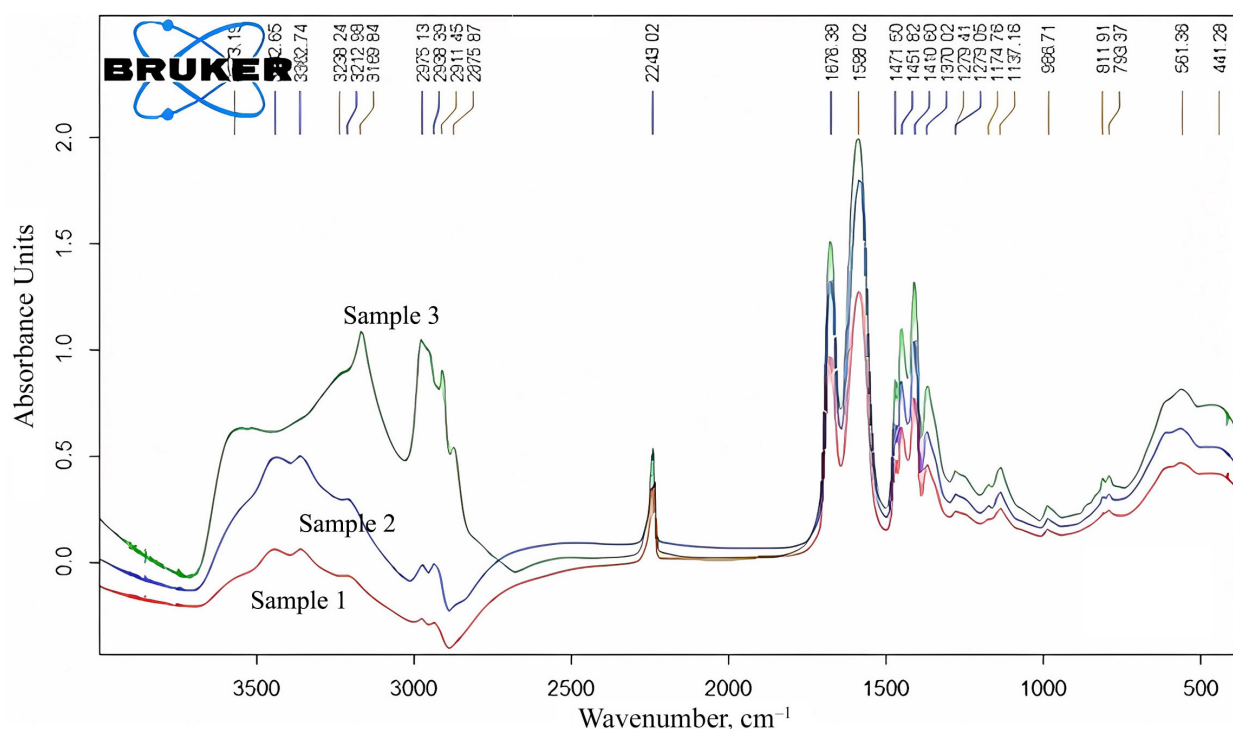


Рис. 2. ИК-спектры растворов полимерного связующего LA132 (цвет онлайн)

Fig. 2. IR spectra of LA132 polymer binder solutions (color online)

и  $1560\text{ см}^{-1}$ , которые можно отнести к валентным колебаниям групп  $\text{C}=\text{O}$ .

ИК-спектры сухого остатка выглядят схожим образом: в области  $2500\text{--}400\text{ см}^{-1}$  спектры всех трех пленок также практически идентичны. Подтверждается наличие в составе полимера нитрильных групп (полоса поглощения с максимумом при  $2243\text{ см}^{-1}$ ). Это дает основание предположить присутствие в составе полимера звеньев акрилонитрила. В спектрах пленок проявляются и характеристические полосы валентных колебаний групп  $\text{C}=\text{O}$  ( $1676$  и  $1588\text{ см}^{-1}$ ), однако они оказались сдвинуты в высокочастотную область по сравнению со спектрами растворов, а соотношение их интенсивностей поменялось на обратное.

На основании литературных данных и полученных результатов элементного анализа полосу поглощения сухого остатка с максимумом при  $1588\text{ см}^{-1}$  можно отнести к колебаниям ионизированной карбоксильной группы в составе мономерных звеньев литиевой соли метакриловой кислоты. Это

подтверждается наличием второй характеристической полосы поглощения ионизированной карбоксильной группы при  $1410\text{ см}^{-1}$ , наблюдаемой в спектрах солей карбоновых кислот. Полосу при  $1676\text{ см}^{-1}$  можно отнести к колебаниям  $\text{C}=\text{O}$  либо в составе неионизированной карбоксильной группы, либо в составе амидной группы. Вторым вариантом представляется более вероятным, так как в спектрах образцов не обнаруживаются ни полосы валентных колебаний групп  $\text{O}-\text{H}$  карбоновых кислот в области  $2500\text{--}2700\text{ см}^{-1}$ , ни полосы деформационных колебаний этих групп в области  $900\text{--}940\text{ см}^{-1}$  (см. рис. 2). В то же время в области  $3100\text{--}3600\text{ см}^{-1}$  во всех спектрах имеются сложные полосы поглощения, характерные для полиакриламида и относящиеся к валентным колебаниям групп  $\text{N}-\text{H}$ , а также полосы при  $2975\text{ см}^{-1}$ , характерные для групп  $-\text{CH}_3$ . Присутствие метильных групп обусловлено присутствием звеньев метакрилонитрила.

Следует отметить, что состав образцов связующего № 1 и № 2, по данным ИК-

спектроскопии, практически идентичен, тогда как для образца № 3 наблюдаются существенные отличия в области волновых чисел  $>2500\text{ см}^{-1}$ , где проявляются валентные колебания групп С-Н, С-N и О-Н. Это может быть обусловлено присутствием остаточной воды в образце.

Термограммы образцов водных растворов связующего приведены на рис. 3 в виде кривых термогравиметрии (TG) и дифференциального термического анализа (DSC);

на рис. 4 представлены эти же кривые TG и DSC вместе с данными масс-спектрометрии, полученными синхронно. Содержание сухого вещества в образцах водных растворов связующего по данным TG составляет от 15.9 до 17.3 мас.%. По полученным данным TG вода из образца № 2 при вакуумной сушке при  $100^\circ\text{C}$  была удалена полностью в течение 1 суток, тогда как в образце № 3 присутствовало остаточное количество воды (1.2%). Результаты

По полученным данным TG вода из образца № 2 при вакуумной сушке при  $100^\circ\text{C}$  была удалена полностью в течение 1 суток, тогда как в образце № 3 присутствовало остаточное количество воды (1.2%). Результаты

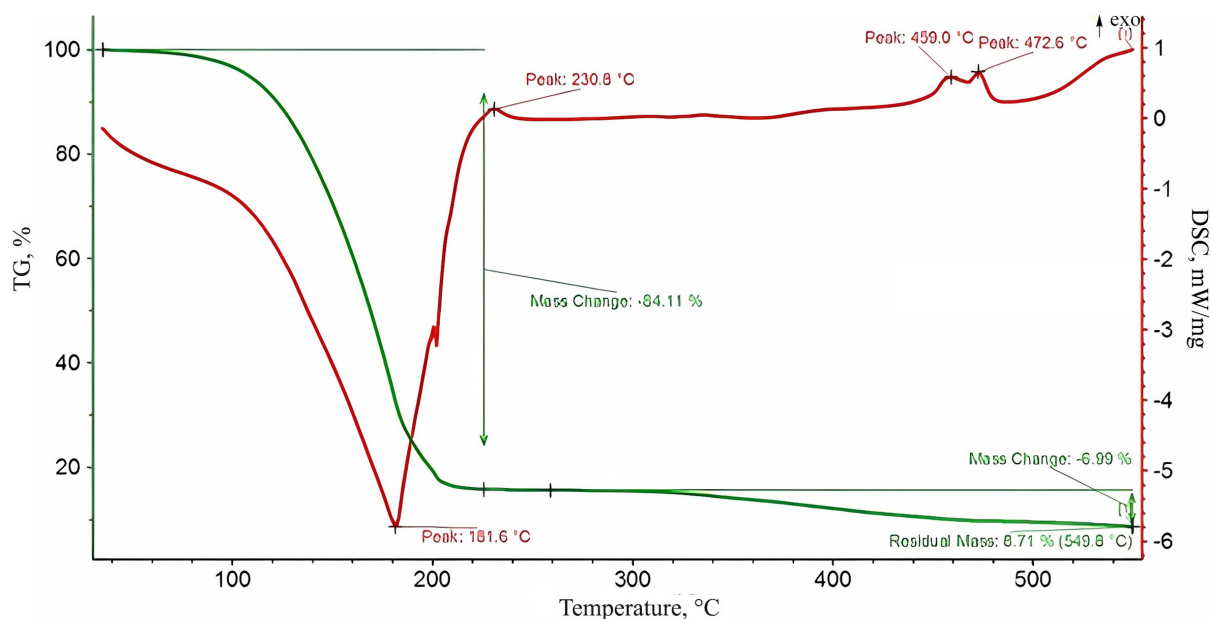


Рис. 3. Термограмма образца раствора связующего LA132 (цвет онлайн)  
Fig. 3. Thermogram of LA132 binder solution sample (color online)

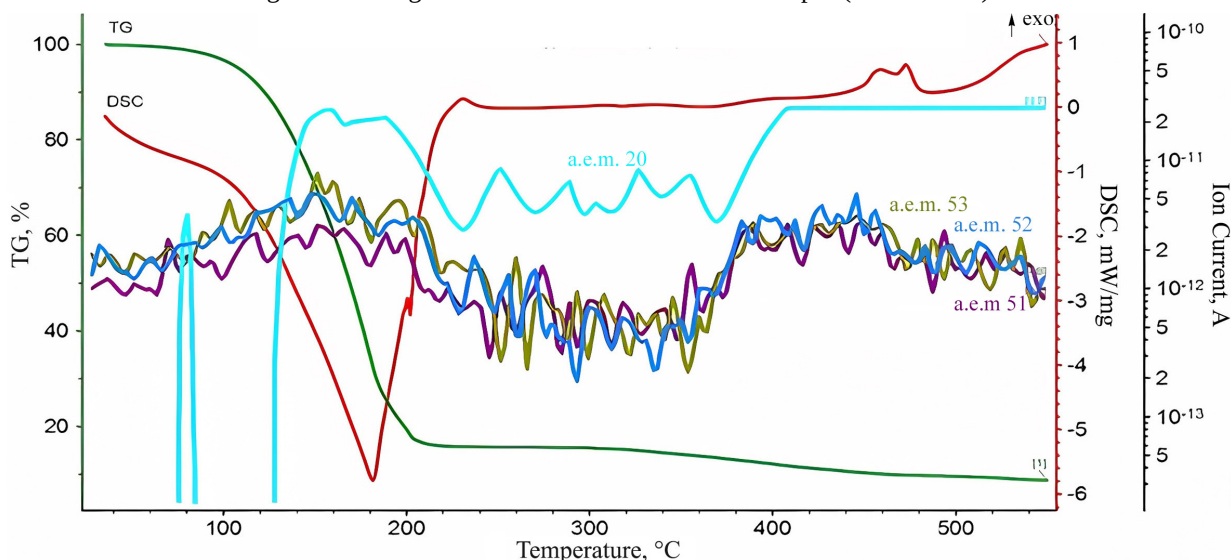


Рис. 4. Результаты синхронного анализа образца LA132 методами TG, DSC и масс-спектрометрии (цвет онлайн)  
Fig. 4. The results of simultaneous analysis of LA132 sample by TG, DSC and mass spectrometry methods (color online)

термического анализа сухого остатка обобщены в таблице. Следует отметить, что они в целом согласуются с процессами, идентифицированными при анализе растворов связующего, и детализируют их.

На рис. 5 приведена зависимость разрядной емкости при ресурсном испытании литий-железо-фосфатного аккумулятора пакет-

ной конструкции с номинальной емкостью 1.0 А·ч, изготовленного с использованием водного связующего LA132 и СМС в составе отрицательного электрода и нанотрубок в составе положительного электрода на основе LiFePO<sub>4</sub>. Оптимальным содержанием полиакрилового латекса LA132 в положительном электроде литий-ионного аккумулятора счи-

Результаты исследования термического поведения пленок полимерного связующего LA132 методами TG, DSC и MS  
Table. The study results of thermal behavior of LA132 polymer binder films by TG, DSC and MS methods

Характеристика / Characteristics	Образец № 1 / Sample No. 1	Образец № 2 / Sample No. 2	Образец № 3 / Sample No. 3
Температура максимума экзотермического эффекта, не сопровождающегося убылью массы, °С / Temperature of the maximum of the exothermic effect not accompanied by mass loss, °C	235	230	230
Убыль массы $\Delta m$ , % / Mass loss $\Delta m$ , %	30.9	32.1	45.4
Интервал температур, отвечающий $\Delta m_1$ , °С / Temperature interval corresponding to $\Delta m_1$ , °C	250–550	220–550	213–550
Данные масс-спектрологии для газовой фазы в интервале температур, отвечающем $\Delta m_1$ , а.е.м. / Mass spectrometry data for the gas phase in the temperature interval corresponding to $\Delta m_1$ , amu	18 – H <sub>2</sub> O; 44 – CO <sub>2</sub> ; 30 и 46 – NO <sub>2</sub>	18 – H <sub>2</sub> O; 44 – CO <sub>2</sub> ; 30 и 46 – NO <sub>2</sub>	18 – H <sub>2</sub> O; 44 – CO <sub>2</sub> ; 30 и 46 – NO <sub>2</sub>
Температуры максимумов экзотермических эффектов, наблюдаемых на фоне убыли массы образца, °С / Temperatures of the maxima of exothermic effects observed against the background of sample mass loss, °C	329 – 430 –	333 347 442 –	307 422 467 483

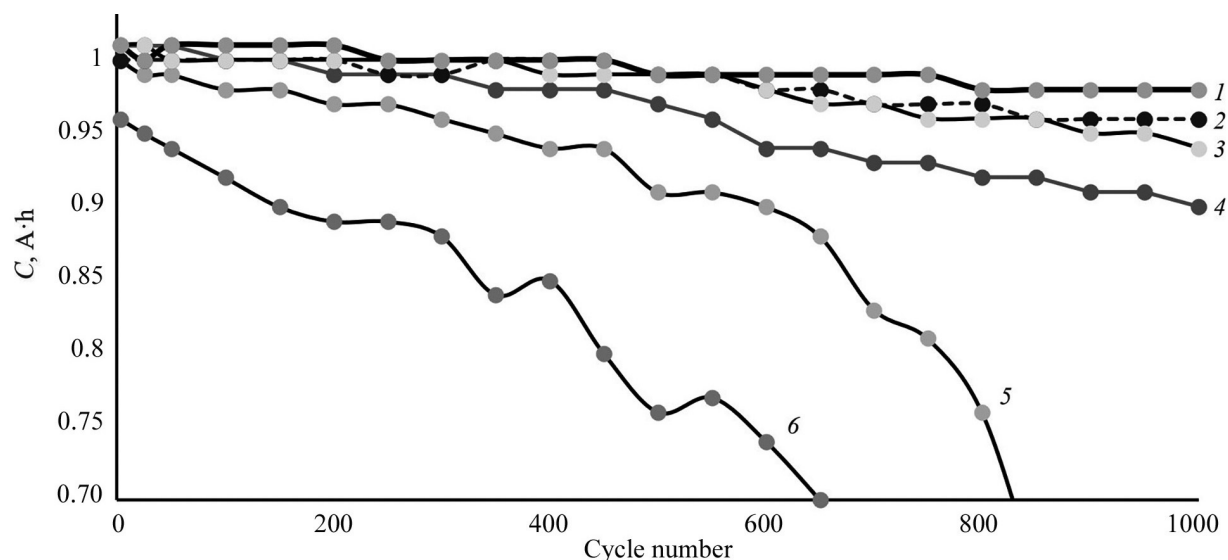


Рис. 5. Кривые зависимости емкости от номера цикла при ресурсном циклировании литий-железо-фосфатных аккумуляторов, изготовленных с применением водного связующего и нанотрубок, при токе заряда/разряда 0.2С: 1 – СМС с нанотрубками; 2 – LA132 (свежеизготовленный) с нанотрубками; 3 – СМС без нанотрубок; 4 – LA132 (свежеизготовленный) без нанотрубок; 5 – LA132 (после хранения 6 месяцев) без нанотрубок; 6 – LA132 (после хранения 12 месяцев) без нанотрубок

Fig. 5. Capacity dependency curves on the cycle number at cycling life test of lithium iron phosphate batteries manufactured using aqueous binder and nanotubes, at charge/discharge current of 0.2C: 1 – CMC with nanotubes; 2 – LA132 (fresh) with nanotubes; 3 – CMC without nanotubes; 4 – LA132 (fresh) without nanotubes; 5 – LA132 (stored for 6 months) without nanotubes; 6 – LA132 (stored for 12 months) without nanotubes

тается 3–6%. Видно, что использование связующего LA132 с истекшим сроком годности (хранившегося более 6 месяцев) не допустимо. Применение однослойных углеродных нанотрубок ОУНТ производства компании OCSiAl повышает ресурс литий-железо-фосфатного аккумулятора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные при исследовании образцов водных растворов полимерного связующего LA132 с использованием различных методов, хорошо согласуются между собой и позволяют заключить, срок хра-

нения данного связующего составляет 6 месяцев, поскольку за это время основные характеристики LA132, влияющие на его функциональные свойства в составе электродов, не претерпевают существенных изменений.

В зависимости от состава электродов, марки и производителя водного связующего ресурс литий-железо-фосфатного аккумулятора с модифицированным углеродом LiFePO<sub>4</sub> с применением нанотрубок в качестве токопроводящей добавки в составе электродов может составлять от 1200 до 5000 циклов до снижения величины разрядной емкости при нормальных климатических условиях на 20% от номинальной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Daniel C., Mohanty D., Li J., Wood D. L. Cathode materials review. *AIP Conf. Proc.*, 2014, vol. 1597, pp. 26–43. <https://doi.org/10.1063/1.4878478>
2. Cherkouk C., Nestler T. Cathodes – Technological review. *AIP Conf. Proc.*, 2014, vol. 1597, pp. 134–145. <https://doi.org/10.1063/1.4878484>
3. Zaghbi K., Guerfi A., Hovington P., Vijn A., Trudeau M., Mauger A., Goodenough J. B., Julien C. M. Review and analysis of nanostructured olivine-based lithium rechargeable batteries: Status and trends. *J. Power Sources*, 2013, vol. 232, pp. 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.12.095>, EDN: RICRNR
4. Kovalenko I., Zdyrko B., Magasinski A., Hertzberg B., Milicev Z., Burtovyy R., Luzinov I., Yushin G. A Major Constituent of Brown Algae for Use in High-Capacity Li-Ion Batteries. *Science*, 2011, vol. 334, pp. 75–79. <https://doi.org/10.1126/science.1209150>
5. Chockla A. M., Bogart T. D., Hessel C. M., Klavetter K. C., Mullin C. B., Korgel B. A. Influences of Gold, Binder and Electrolyte on Silicon Nanowire Performance in Li-Ion Batteries. *J. Phys. Chem. C*, 2012, vol. 116, pp. 18079–18086. <https://doi.org/10.1021/jp305371v>
6. Versaci D., Nasi R., Zubair U., Amici J., Sgroi M., Dumitrescu M. A., Francia C., Bodoardo S., Penazzi N. New eco-friendly low-cost binders for Li-ion anodes. *J. Solid State Electrochem.*, 2017, vol. 21, pp. 3429–3435. <https://doi.org/10.1007/s10008-017-3665-5>, EDN: ASNHFC
7. Chong J., Xun S., Zheng H., Song X., Liu G., Ridgway P., Wang J. Q., Battaglia V. S. A comparative study of polyacrylic acid and poly(vinylidene difluoride) binders for spherical natural graphite/LiFePO<sub>4</sub> electrodes and cells. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, pp. 7707–7714. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.04.043>
8. Sivasankaran V., Marino C., Chamas M., Soudan P., Guyomard D., Jumas J. C., Lippens P. E., Monconduit L., Lestriez B. Improvement of intermetallics electrochemical behavior by playing with the composite electrode formulation. *J. Mater. Chem.*, 2011, vol. 21, pp. 5076–5082. <https://doi.org/10.1039/C0JM03831H>
9. Chudinov E. A. *Lithium iron phosphate battery: Monograph*. Moscow, Pero, 2016. 83 p. (in Russian).
10. Chen M., Wang X., Shu H., Yu R., Yang X., Huang W. Solvothermal Synthesis of Monodisperse Micro-Nanostructure Starfish-Like Porous LiFePO<sub>4</sub> as Cathode Material for Lithium-Ion Batteries. *J. Alloys Compd.*, 2015, vol. 652, pp. 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.08.221>
11. Yu Z. L., Wu M. C., Zhang Q. T., Feng S. N., Zhou G. M., Zhu J. G., Qu M. Z., Zhang D., Zheng L. *Process for producing carbon nano-tube/granular carbon complex*. Patent CN, no. 101428783. 2009.
12. Yu Z. L., Zhou G. M., Zhang Q. T., Qu M. Z. *Process for direct producing carbon nanotube composite conductive agents*. Patent CN, no. 101380080. 2009.
13. Haoxiang Zhong H., Sun M., Li Y., He J., Yang J., Zhang L. The polyacrylic latex: An efficient water-soluble binder for LiNi<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> cathode in Li-ion batteries. *J. Solid State Electrochem.*, 2016, vol. 20, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1007/s10008-015-2967-8>, EDN: YTDWWM

Поступила в редакцию 20.08.2025; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 21.05.2026; опубликована 30.06.2026  
The article was submitted 20.08.2025; approved after reviewing 01.04.2026; accepted for publication 21.05.2026; published 30.06.2026