

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2658>
<https://elibrary.ru/JWZYDU>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Использование отходов зерноводства для производства литий-ионных аккумуляторов



Н. А. Муравьева^{1,*}, Н. Ю. Наветный¹, Д. А. Полыньёв¹,
Е. В. Примаченко¹, Я. А. Масютин¹, М. Ирфан²

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Кант^{ROR}, Калининград, Россия

² Университет Саргодха^{ROR}, Пенджаб, Пакистан

Поступила в редакцию: 17.06.2026

Принята после рецензирования: 14.08.2026

Принята к публикации: 01.09.2026

*e-mail: natahlie98@gmail.com

© Н. А. Муравьева, Н. Ю. Наветный, Д. А. Полыньёв,
Е. В. Примаченко, Я. А. Масютин, М. Ирфан, 2026



Аннотация.

Масштабирование производства зерновых культур в Калининградской области (Россия) сопровождается образованием более 200 тыс. т соломы в год, утилизация которой наносит экологический ущерб. Цель исследования – изучить возможность и целесообразность использования биоугля из соломы для производства литий-ионных аккумуляторов, а также выбрать наиболее перспективный метод и технологические параметры его получения.

Объектом исследования служила солома озимой пшеницы, отобранная в хозяйствах Калининградской области. Сырье подвергали гидротермальной карбонизации с варьированием температуры (200–260 °С), времени (1–3 ч) и гидромодуля (1:6, 1:12, 1:18). Оптимальные режимы гидротермальной карбонизации составили: 260 °С, 60 мин, гидромодуль 1:12. Полученный биоуголь дополнительно подвергали многостадийному пиролизу при температуре до 800 °С. Характеристику продуктов проводили методами элементного анализа, гравиметрии, лазерной дифракции, а также электрохимическим тестированием в составе лабораторных литий-ионных аккумуляторов дискового типа в сравнении с коммерческим графитом AGP-2.

Элементный состав исходной соломы показал высокое содержание углерода (44,2 %), что подтверждает ее пригодность для термохимической конверсии. После гидротермальной карбонизации при оптимальных условиях массовая доля углерода возросла до 61,3 %, а после пиролиза – до 80–95 %. Средний размер частиц биоугля ($D_{50} = 26,2$ мкм) соответствует отраслевым стандартам для анодных материалов. Электрохимические испытания продемонстрировали, что опытный образец обладает более высокой начальной удельной емкостью по сравнению с коммерческим графитом, однако характеризуется пониженной стабильностью при циклировании, что обусловлено формированием твердого защитного межфазного слоя и аморфной структурой материала.

Экспериментально подтверждена возможность использования соломы озимой пшеницы в качестве прекурсора для синтеза биоугля, пригодного для изготовления анодов литий-ионных аккумуляторов. Данный подход снижает потребление невозобновляемых ресурсов и углеродный след агропромышленного комплекса. Дальнейшие исследования должны быть направлены на повышение стабильности электрохимических характеристик.

Ключевые слова. Переработка отходов, солома пшеничная, биоуголь, гидротермальная карбонизация, литий-ионные батареи

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации проекта «Изучение научно-технологических основ секвестрации парниковых газов за счет производства и применения биоугля из отходов сельского хозяйства и бросовой биомассы высокоинвазивных растений», FZWM-2026-0004 (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

Для цитирования: Муравьева Н. А., Наветный Н. Ю., Полыньёв Д. А., Примаченко Е. В., Масютин Я. А. и др. Использование отходов зерноводства для производства литий-ионных аккумуляторов. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 3. С. 639–653. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2658>

Grain Industry Waste in Lithium-Ion Battery Production



Natalia A. Muravieva^{1,*}, Nikita Yu. Navetnykh¹,
Daniil A. Polynev¹, Elisaveta V. Primachenko¹,
Yakov A. Masyutin¹, Muhammad Irfan²

¹ Baltic Federal University^{ROR}, Kaliningrad, Russia

² University of Sargodha^{ROR}, Punjab, Pakistan

Received: 17.06.2026

Revised: 14.08.2026

Accepted: 01.09.2026

*e-mail: natahlie98@gmail.com

© N.A. Muravieva, N.Yu. Navetnykh, D.A. Polynev, E.V. Primachenko,
Y.A. Masyutin, M. Irfan, 2026



Abstract.

The Kaliningrad Region generates over 200,000 tons of straw annually, and its disposal often causes environmental degradation. However, straw-derived biochar can be utilized in the production of lithium-ion batteries. This article describes the most effective processing methods and structural parameters for this application.

The study utilized winter wheat straw collected from farms in the Kaliningrad Region. The raw material was subjected to hydrothermal carbonization with varying temperatures (200–260°C), residence times (1–3 h), and water-to-biomass ratios (1:6, 1:12, 1:18). The optimal hydrothermal carbonization conditions proved to be 260°C for 60 min with a water ratio of 1:12. The resulting biochar was then subjected to multi-stage pyrolysis at temperatures up to 800°C. The products were characterized using elemental analysis, gravimetry, laser diffraction, and electrochemical testing in laboratory coin-cell lithium-ion batteries, which were compared against commercial AGP-2 graphite.

The elemental composition of the precursor straw revealed a high carbon content (44.2%), confirming its suitability for thermochemical conversion. The hydrothermal carbonization under optimal conditions raised the carbon mass fraction to 61.3%, while the subsequent pyrolysis increased it to 80–95%. The average particle size of the resulting biochar ($D_{50} = 26.2 \mu\text{m}$) complied with industrial standards for anode materials. The electrochemical analysis demonstrated that the prototype possessed a higher initial specific capacity than commercial graphite but lower cycling stability, which could be attributed to its amorphous structure and the formation of a solid electrolyte interphase layer.

Winter wheat straw proved to be an effective precursor for synthesizing biochar suitable for lithium-ion battery anodes. This approach reduces the consumption of non-renewable resources and lowers the carbon footprint of the agricultural sector. Further research is required to enhance the stability of its electrochemical properties.

Keywords. Waste recycling, wheat straw, biochar, hydrothermal carbonation, lithium-ion batteries

Funding. The research was carried out as part of the project implementation “Study of the scientific and technological foundations of greenhouse gas sequestration through the production and use of biochar from agricultural waste and waste biomass of highly invasive plants”, FZWM-2026-0004 (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation).

For citation: Muravieva NA, Navetnykh NYu, Polynev DA, Primachenko EV, Masyutin YA, et al. Grain Industry Waste in Lithium-Ion Battery Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2026;56(3):639–653. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-3-2658>

Введение

Калининградская область (Россия) занимает лидирующие позиции по объему выращивания основных злаковых и масличных культур, включая пшеницу, сою и рапс¹. Доминирующей зерновой культурой являются озимые сорта пшеницы, что обусловлено высокой урожайностью, повышенной устойчивостью к комплексу абиотических и биотических стрессовых факторов и технологичностью возделывания [1]. В 2023 г. посевные площади озимой пшеницы с 2013 г. увеличились

более чем в два раза: с 34,5 до 75,9 тыс. га². С ростом урожайности пропорционально возрастают объемы образующихся растительных отходов, требующих переработки. Принимая во внимание нормативные показатели выхода соломы, составляющие для озимой пшеницы в среднем 30–40 ц с гектара [2], расчетный совокупный объем образующейся соломенной биомассы только за 2023 г. составил более 200 тыс. т. Указанная проблема является актуальной не только

¹ Растениеводство. URL: <https://mcx.gov39.ru/rastenievodstvo/> (дата обращения 29.12.2025).

² Сельское хозяйство. Зерновые и зернобобовые. URL: https://39.rosstat.gov.ru/statistical_news/document/225459 (дата обращения 05.05.2025).

для Калининградской области, но и для территории Российской Федерации в целом. Так, в России в 2025 г. собрано свыше 93 млн т пшеницы, что по расчетам привело к образованию до 139,5 млн т соломы. Расчетный мировой объем образования соломы с учетом ежегодного производства 841,8 млн т пшеницы составляет около 1 млрд т³. Анализ приведенных количественных данных подтверждает не только наличие, но и объективную остроту вопроса рециклинга соломы для предприятий агропромышленного комплекса.

Наиболее распространенным способом утилизации соломы остается ее сжигание на полях, что ведет к загрязнению атмосферного воздуха оксидами углерода и азота, сажей и полициклическими ароматическими углеводородами [3]. При сжигании 1 т соломы в атмосферу выделяется около 350–500 кг углекислого газа, до 20 кг угарного газа, от 4 до 7 кг оксидов азота, 1–3 кг твердых частиц (зола и сажи), а также опасных канцерогенов (бензапирена и диоксина). Регламентированная доля сжигаемой соломы от совокупного годового объема ее образования не превышает 15 %, что в количественном выражении составляет до 30 тыс. т по Калининградской области, до 21 млн т – по Российской Федерации и до 150 млн т – в мировом масштабе. В рамках легального сжигания суммарные валовые выбросы загрязняющих веществ достигают 75×10^9 кг в год, что представляет собой существенный фактор загрязнения атмосферного воздуха. Однако фактическая антропогенная эмиссия оказывается выше из-за систематического превышения разрешенных объемов отдельными сельхозпроизводителями.

В рамках агротехнических практик от 40 до 45 % соломы подвергается заделке в почвенный горизонт с целью восстановления баланса гумуса и повышения содержания органического вещества [4]. Согласно литературным данным, возможны фитосанитарные риски, связанные с деструкцией растительных остатков живыми организмами. В процессе деструкции соломы происходит интенсивная фиксация минерального азота живыми микроорганизмами почвы, в результате чего культивируемые растения испытывают азотное голодание. Дополнительным фактором выступает возникновение и развитие фитопатогенных грибов, провоцирующих массовые вспышки заболеваний посевных культур [4].

Таким образом, существующие способы уничтожения соломенных отходов ведут к многотоннажным выбросам оксидов углерода и азота в атмосферный воздух, а попытки их использования в качестве удобрений сопровождаются ухудшением свойств почвы. На сегодняшний день существует ряд направлений рационального использования соломы, в т. ч. получение продуктов тонкого органического синтеза на основе лигноцеллюлозной биомассы [5], применение

в качестве дисперсного армирующего компонента композитов [6] и синтез биodeградируемых пластиков [7]. Однако данные методы позволяют переработать не более 5 % от общего объема отходов, что сохраняет актуальность поиска новых решений и технологий в данной области. Перспективным направлением представляется использование соломы в качестве сырья для производства биоуглей, отличающихся высокой пористостью и сорбционной способностью. Подобные биоугли уже задействованы в очистке сточных вод и ремедиации загрязненных почв [8]. Наряду с этим инновационным направлением применения биоугля из соломы, обусловленным его высокими емкостными характеристиками, следует признать производство аккумуляторов энергии.

Одним из наиболее распространенных типов аккумуляторов по числу выпускаемых единиц выступают литий-ионные накопители тока. При этом специалисты отмечают ежегодное увеличение объемов производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) в среднем на 20 % в денежном эквиваленте [9], что связано, в первую очередь, с ростом выпуска электромобилей. Согласно прогнозам, к 2030 г. рост рынка по мощности выпускаемых ЛИА составит 400 % – с 700 (2022 г.) до 3000 ГВт·ч [10].

Традиционно в структуре ЛИА в качестве анода применяются углеродные материалы (графит, нанотрубки, нановолокна), способные обратимо интеркалировать ионы лития при зарядке [11]. Наибольшее распространение получил графит, производимый из невозобновляемого ископаемого сырья (графитовых руд, нефтяного или каменноугольного кокса) [12, 13]. Процесс получения такого графита сопряжен с выделением парниковых газов и задействованием токсичных реагентов, в т. ч. плавиковой кислоты [14]. Использование графитовых анодов характеризуется высоким углеродным следом, составляющим от 2,4 до 4,4 кг CO₂-эквивалента на единицу производимой продукции [15].

Таким образом, обостряются две взаимосвязанные экологические проблемы, требующие безотлагательного решения. Первая связана с избыточным накоплением отходов агропромышленного комплекса (соломы), утилизация которых традиционными методами приводит к существенному воздействию на окружающую среду. Вторая проблема обусловлена вовлечением графита в динамично развивающемся производстве ЛИА, добыча и обогащение которого не только истощают минерально-сырьевую базу, но и сопровождаются значительной эмиссией загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Применение биоугля из соломы для производства анодного материала ЛИА помимо утилизации отходов обеспечивает включение более дешевого и возобновляемого сырья взамен традиционных углеродных материалов [16].

Для получения биоугля из растительной биомассы традиционно используют пиролиз, который обеспе-

³ Wheat production. URL: <https://www.fas.usda.gov/data/production/0410000> (дата обращения 18.03.2026).

чивает формирование биоугля со стабильной высокопористой структурой, однако данный метод характеризуется значительной энергоемкостью и не подходит для переработки влажных отходов [17]. Альтернативный метод, протекающий при более низких температурах, – гидротермальная карбонизация. Данный метод применим для высоковлажной биомассы, но приводит к формированию угольного продукта с меньшим содержанием углерода и пониженной удельной площадью поверхности, что может привести к необходимости дополнительной обработки полученного биоугля [18]. При этом конечные физико-механические характеристики и элементный состав биоугля существенно варьируются в зависимости от типа исходного сырья и режимов проведения процесса, что не позволяет, опираясь только на теоретические данные, прогнозировать эффективность угля в химических источниках тока. Цель исследования – изучить возможность и целесообразность использования биоугля из соломы для производства ЛИА, а также выбрать наиболее перспективный метод и технологические параметры его получения.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – солома озимой пшеницы, отобранная в хозяйствах Калининградской области (Гурьевский район, Россия). С микроструктурной позиции данный материал образован полыми цилиндрическими элементами, диаметр внутреннего канала которых существенно превышает толщину стенок. Стенки стебля пронизаны системой продольных капилляров, имеющих в поперечном сечении форму, приближенную к пчелиным сотам, и характеризующихся гексагональной, овальной либо неопределенной конфигурацией; капиллярные структуры располагаются без строгой упорядоченности [19]. Химический состав соломы представлен в таблице 1.

Содержание воды и золы определяли гравиметрически; лигнина – методом кислотного гидролиза в соответствии с ГОСТ 26177-84 «Корма, комбикорма. Метод определения лигнина»; целлюлозу – по ГОСТ 6840-78 «Целлюлоза. Метод определения содержания альфа-целлюлозы». Элементный состав устанавливали с помощью анализатора Vario EL cube (Elementar GmbH, Германия), работающего по принципу каталитического сжигания пробы с последующим адсорбционным разделением газов и их детектированием катарометрическим датчиком.

Выявленное высокое содержание углерода в соломе озимой ($44,20 \pm 0,33$ %) подтверждает гипотезу о перспективности использования данного агропромышленного отхода в качестве прекурсора для получения биоугля. Развитый высокоуглеродистый полимерный матрикс, представленный целлюлозно-лигниновым комплексом, обеспечивает структурную устойчивость биомассы в ходе термохимических превращений. Повышенная исходная концентрация углерода способствует

Таблица 1. Химический состав соломы пшеничной

Table 1. Chemical composition of wheat straw

Показатель, %	Значение
Вода	$5,60 \pm 0,10$
Зола	$7,76 \pm 0,10$
Лигнин	$14,40 \pm 0,30$
Целлюлоза	$22,50 \pm 0,70$
C	$44,20 \pm 0,33$
H	$6,11 \pm 0,070$
N	$0,79 \pm 0,07$
S	$0,02 \pm 0,01$
O	$41,86 \pm 0,69$

уменьшению интенсивности массопереноса и минимизации эмиссии углеродсодержащих летучих соединений на стадиях гидротермальной карбонизации и пиролиза, что в совокупности благоприятствует формированию плотной электропроводящей углеродной архитектуры конечного продукта.

Для термохимической конверсии исходного лигно-целлюлозного сырья в углеродный материал выбран метод гидротермальной карбонизации, признанный наиболее технологически рациональным и экологически безопасным при переработке низкокалорийных и высоковлажных отходов. Сущность данного процесса базируется на последовательности реакций деструкции, гидролиза, дегидратации, декарбоксилирования, а также последующей гетерогенной полимеризации и конденсации промежуточных мономеров органического вещества. Главной технологической особенностью метода является его реализация в водной среде, находящейся в субкритическом состоянии под давлением. В этих условиях вода одновременно выполняет функции экологически чистого растворителя и химического реагента. Именно в водной среде происходят кислотно-основные взаимодействия процесса. Высокая диэлектрическая проницаемость и повышенное ионное произведение субкритической воды обеспечивают эффективную деструкцию гемицеллюлозного и аморфного целлюлозного комплексов соломы озимой пшеницы. Это позволяет направленно синтезировать твердый биоуголь из жидкой фазы, минимизируя прямую эмиссию летучих органических соединений в атмосферу [20].

Солому предварительно высушивали в сушильном шкафу при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3–4 ч, затем измельчали на лабораторной ножевой дробилке. Для получения фракции размером 2 мм частицы просеивали через лабораторное сито с диаметром ячеек 2 мм. Подготовленные частицы смешивали с дистиллированной водой в соотношениях 1:6; 1:12 и 1:18 до объема 300 мл. Смесь помещали в реактор-автоклав периодического действия, оборудованный магнитной мешалкой, термпарой для контроля температуры и системой автоматического программирования максимальной температуры нагрева (рис. 1). Реактор выполнен из нержавеющей

веющей стали и рассчитан на давление до 10 МПа, температуру до 380 °С и объем 310 мл. Начальная температура внутри автоклава составляла 18–20 °С. Температура и время нагрева варьировались от 200 до 260 °С (табл. 2). По окончании нагревания реактор помещали на холодную водяную баню с непрерывной подачей холодной воды для охлаждения до 25 °С. После охлаждения газовую фазу отводили в вытяжной шкаф. Смесь фильтровали с помощью воронки Бюхнера, твердый остаток (биоуголь) высушивали при 105 °С в течение 12 ч.

На втором этапе биоуголь подвергали многоступенчатому пиролизу на лабораторной установке (рис. 2), включающей трубчатую печь пиролиза с контролем температуры и возможностью программирования температурных режимов, систему ввода инертного газа (азота) и систему отведения газообразных продуктов.

Установка оборудована системой воздушного охлаждения внешнего корпуса для предотвращения перегрева деталей. Образцы размещали в керамических бюксах внутри кварцевой трубки диаметром 30 мм.

Биоуголь подвергали карбонизации в атмосфере азота объемом 250 мл. На первой стадии температуру повышали в течение 60 мин до 300 °С и выдерживали в течение 30 мин. На второй стадии температуру увеличивали до 600 °С за 60 мин и выдерживали образец в течение 60 мин. Затем температуру доводили до 700 °С и выдерживали 90 мин. После нагрева температуру снижали сначала до 300 °С в течение 60 мин, затем до 200 °С. В результате получен биоуголь, который в дальнейшем использовали при формировании электродов литий-ионных аккумуляторов (ЛИА).

Характеристики полученных биоуглей оценивали общепринятыми физико-химическими методами. Выход продукта определяли по соотношению исходной массы соломы и массы полученного биоугля. Зольность выявляли прокаливанием навески в течение 4–5 ч при температуре 525 °С. Элементный анализ выполняли с использованием Vario EL Cube (Elementar, Германия) в режиме CHNS, принцип действия которого основан на измерении хроматографических пиков N₂, CO₂, H₂O и SO₂. Размер частиц в биоугле определяли методом лазерной

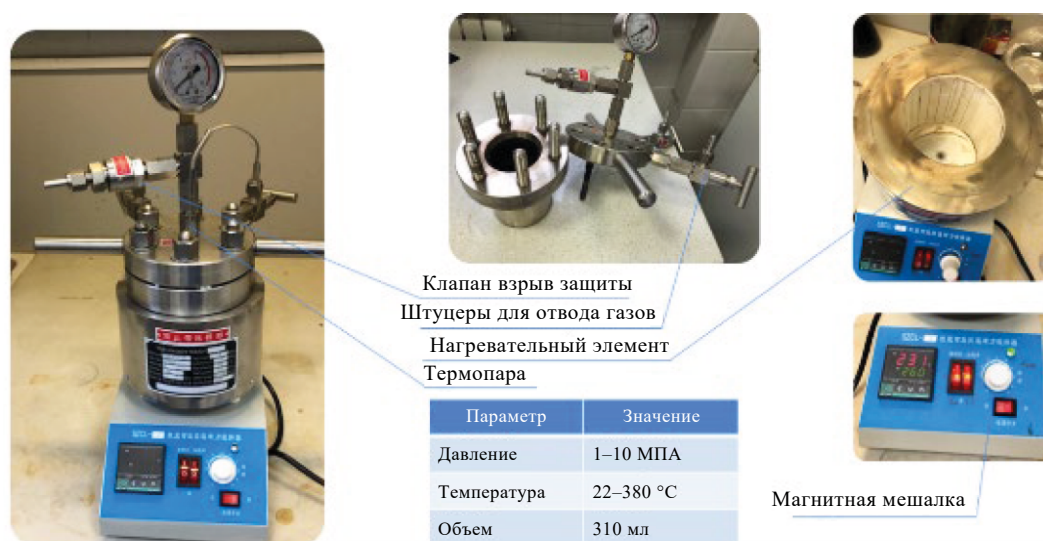


Рисунок 1. Реактор-автоклав для проведения гидротермальной карбонизации

Figure 1. Autoclave reactor for hydrothermal carbonization

Таблица 2. Варьирование температуры и времени процесса гидротермальной карбонизации

Table 2. Variation of temperature and time of the hydrothermal carbonation process

Эксперимент	Размер частиц, мм	Температура, °С	Время, ч	Гидро модуль, биомасса:вода
1	2	200	1	1:12
2	2	200	2	1:12
3	2	200	3	1:12
4	2	230	1	1:12
5	2	230	2	1:12
6	2	230	3	1:12
7	2	260	1	1:12
8	2	260	2	1:12
9	2	260	3	1:12

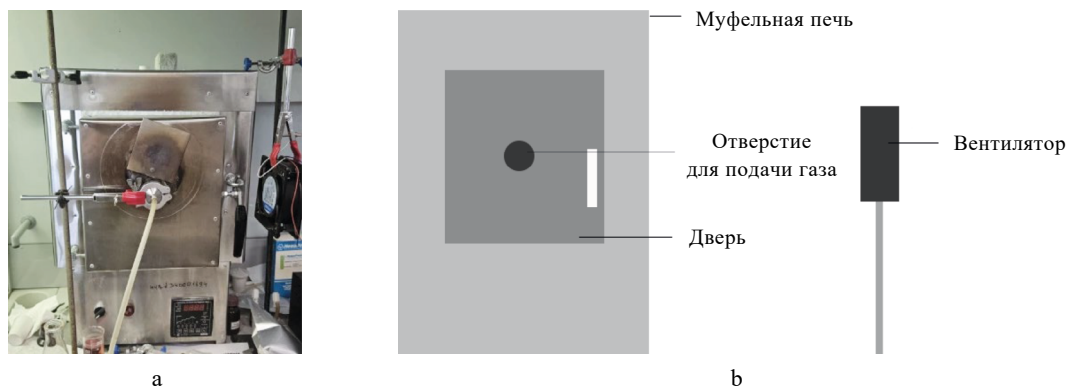


Рисунок 2. Установка для пиролиза: а – общий вид; б – основные элементы

Figure 2. Pyrolysis furnace unit: a – general view; b – main elements

дифракции на анализаторе размера частиц Wintrac 2000 с помощью запатентованной двухлучевой технологии. Для испытаний изготавливали ЛИА дискового типа с номинальным напряжением 3 В, диаметром 20 мм и толщиной 1,6 мм, в которых в качестве анода использовали биоуголь из соломы озимой пшеницы.

Известно, что в процессе эксплуатации ЛИА теряют мощность из-за уменьшения количества активных ионов лития после каждого цикла. Один цикл включает полную зарядку и разрядку аккумулятора. Для исследования ресурсных характеристик ЛИА применяют метод циклирования. В процессе циклирования на аноде оседает металлический литий, что также приводит к снижению мощности батареи. При длительном использовании происходит деградация катода с образованием инертной фазы и горючих газообразных продуктов. Все перечисленные процессы приводят к нарушению баланса емкостей электродов. В начале циклирования на поверхности электродов образуется пассивирующая пленка твердого электролита. В дальнейшем эта пленка частично разрушается, и обнаженный анод вступает в реакцию с электролитом с образованием новой пленки. Таким образом, расходуются ионы лития и электролит, вследствие чего емкость батареи снижается.

Для оценки срока службы ЛИА проводят многократные циклы заряда-разряда. В процессе испытаний фиксируют кривые заряда и разряда, на основе этих графиков в дальнейшем определяют разрядную емкость, энергию, рабочее напряжение и его стабильность. Кроме того, устанавливают взаимосвязь между электродным потенциалом и степенью заряда. По экспериментальным данным рассчитывают кулоновскую эффективность, а также строят зависимости спада емкости и снижения напряжения от числа проведенных циклов.

Результаты и их обсуждение

На начальном этапе исследований гидротермальной карбонизации соломы озимой пшеницы проведено варьирование ключевых технологических параметров

процесса. Температурный режим реакционной среды изменяли в диапазоне от 200 до 260 °C с шагом 30 °C, а продолжительность нагревания варьировали от 1 до 3 ч с шагом 1 ч. В качестве критериев оптимизации использовали массовый выход биоугля (%) и его элементный состав (%). На рисунке 3 представлена зависимость выхода биоугля от варьируемых факторов.

При увеличении температуры и длительности обработки снижается выход готового биоугля. Это объясняется ускорением гидролитического распада гемицеллюлозы и аморфных участков целлюлозы, а также интенсификацией реакций декарбоксилирования и дегидратации. Максимальное значение выхода твердого продукта (56 %) зафиксировано при наиболее мягком режиме – температуре 200 °C и продолжительности выдержки 1 ч. Однако при этих параметрах глубина карбонизации лигноцеллюлозной матрицы остается минимальной.

Основным критерием, определяющим пригодность и электрохимическую активность синтезируемых углеродных материалов, служит их элементный состав, а именно содержание углеродной фазы. Результаты количественного элементного анализа и определения зольности твердых продуктов гидротермальной карбонизации соломы озимой пшеницы в зависимости от технологических параметров процесса представлены в таблице 3.

Анализ экспериментальных данных позволяет проследить динамику деструкции лигноцеллюлозной матрицы. Интенсификация параметров карбонизации закономерно индуцирует выраженный рост массовой доли общего углерода с одновременным снижением концентрации кислорода и водорода. При этом кинетика накопления углерода носит немонотонный характер. При температуре 260 °C увеличение изотермической выдержки с 1 до 2 ч приводит к достижению максимума карбонизации – $63,58 \pm 0,17$ %. Дальнейшее повышение времени выдержки до 3 ч приводит к снижению углерода ($62,53 \pm 0,22$ %), что свидетельствует о протекании вторичных деструктивных

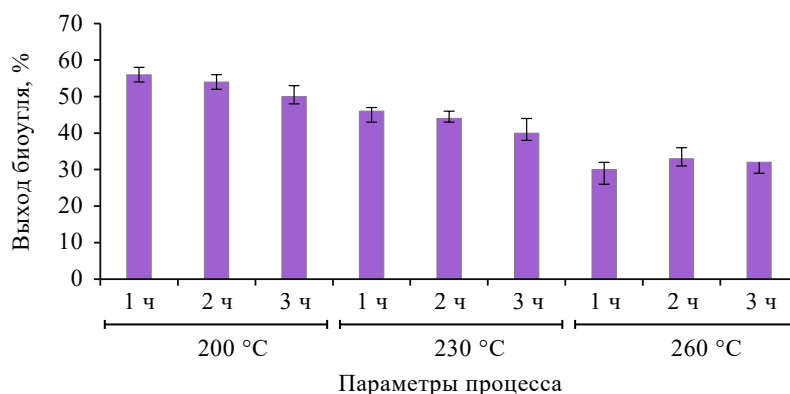


Рисунок 3. Выход биоугля, полученного методом гидротермальной карбонизации, при различных параметрах

Figure 3. Yield of biochar obtained by hydrothermal carbonation under various processing parameters

Таблица 3. Элементный состав биоугля, %, полученного при различных параметрах

Table 3. Elemental composition of biochar across different processing parameters, %

Параметры	C	H	O	N	S	Зола
200 °C, 1 ч	46,11 ± 0,76	5,794 ± 0,108	42,56 ± 1,30	0,31 ± 0,08	0,194 ± 0,073	5,03 ± 0,28
200 °C, 2 ч	48,58 ± 0,20	5,782 ± 0,074	41,34 ± 0,55	0,02 ± 0,03	0,097 ± 0,029	4,18 ± 0,22
200 °C, 3 ч	49,19 ± 0,07	5,842 ± 0,020	40,93 ± 0,35	0,02 ± 0,03	0,086 ± 0,023	3,93 ± 0,21
230 °C, 1 ч	52,28 ± 0,52	5,806 ± 0,375	36,66 ± 1,39	0,19 ± 0,40	0,037 ± 0,053	5,03 ± 0,04
230 °C, 2 ч	54,47 ± 1,00	5,560 ± 0,157	35,14 ± 1,56	0,13 ± 0,12	0,085 ± 0,024	4,62 ± 0,26
230 °C, 3 ч	56,91 ± 0,35	5,568 ± 0,027	33,22 ± 0,45	0,08 ± 0,02	0,066 ± 0,028	4,16 ± 0,02
260 °C, 1 ч	61,33 ± 0,65	5,143 ± 0,154	27,31 ± 1,06	0,22 ± 0,20	0,052 ± 0,037	5,95 ± 0,02
260 °C, 2 ч	63,58 ± 0,17	5,377 ± 0,035	23,93 ± 0,55	0,38 ± 0,03	0,111 ± 0,031	6,62 ± 0,28
260 °C, 3 ч	62,53 ± 0,22	5,176 ± 0,019	26,51 ± 0,45	0,24 ± 0,05	0,058 ± 0,044	5,49 ± 0,12

Таблица 4. Элементный состав биоугля, %, полученного при различных гидромодулях

Table 4. Elemental composition of coals obtained with different hydraulic modules

Гидромодуль, солома:вода	C	H	O	N	S	Зола
1:6	55,49 ± 0,16	5,570 ± 0,011	33,47 ± 0,24	0,04 ± 0,02	0,067 ± 0,020	5,36 ± 0,03
1:12	54,47 ± 1,00	5,560 ± 0,157	35,14 ± 1,56	0,13 ± 0,12	0,085 ± 0,024	4,62 ± 0,26
1:18	51,84 ± 0,33	5,793 ± 0,013	39,40 ± 0,47	0	0,008 ± 0,014	2,96 ± 0,11

реакциях в образце. При ужесточении параметров также изменяется зольность продукта, что дополнительно подтверждает структурную перестройку. Для использования в анодах литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) углеродный материал должен обладать высокой углеродистостью и энергоемкостью. С учетом требований оптимальными условиями гидротермальной карбонизации являются: температура 260 °C и продолжительность 60 мин.

При исследовании влияния различных значений гидромодуля дополнительно оценивали выход продукта (%) и элементный состав биоугля. Наибольший выход продукта (44 ± 1%) получен при гидромодуле 1:12 (солома:вода), при увеличении модуля до 1:18 и уменьшении до 1:6 зафиксировано снижение выхода биоугля до 42 ± 2 и 37 ± 5 % соответственно. При недо-

статочном количестве водной фазы в реакционной среде создаются условия, способствующие преобладанию процессов обугливания, которые, в отличие от гидротермальной карбонизации, протекают с более интенсивной деструкцией органического вещества и, как следствие, приводят к снижению выхода твердого продукта. Элементный состав полученных продуктов представлен в таблице 4.

С увеличением гидромодуля наблюдается снижение массовой доли углерода с 55,49 до 51,84 % вследствие гидролитических реакций в разбавленной реакционной среде, препятствующих полноценной конденсации углеродного скелета. Кроме того, с ростом содержания воды снижается зольность с 5,36 до 2,96 %, что объясняется более эффективным извлечением и переходом в раствор минеральных компонентов

при увеличении объема водной фазы. В условиях большего объема воды процессы диффузии и массопереноса минеральных соединений из твердой фазы в жидкую интенсифицируются, что приводит к более полному удалению зольных элементов из формирующегося биоугля. Наиболее оптимальными условиями для использования полученного биоугля в ЛИА признан гидромодуль 1:12 ввиду высокого выхода продукта и среднего содержания углерода в элементном составе. Итоговая технологическая схема изготовления биоугля для ЛИА из соломы озимой пшеницы предусматривает гидротермальную карбонизацию при условиях: гидромодуль 1:12, температура 260 °С, продолжительность 60 мин. Поскольку для электродных композиций требуется повышенное содержание углерода и развитая пористая структура, полученный биоуголь подвергали многостадийному высокотемпературному пиролизу в муфельной печи в инертной атмосфере азота по технологии, описанной выше.

После пиролитической обработки содержание углерода в конечном продукте достигало 80–95 %, что соответствует диапазону, оптимальному для использования в качестве активного компонента электродов ЛИА.

Для стабильной и качественной работы батареи необходимо наличие пространства между частицами угля в электроде, через которое беспрепятственно будут проходить ионы лития. Стандартный размер частиц (распределение D_{50}) для графитового анода в литий-ионных батареях обычно составляет от 20 до 30 мкм. Такой диапазон обеспечивает оптимальный баланс между площадью поверхности, плотностью упаковки и скоростью интеркаляции (внедрения) ионов лития. Для оценки размера частиц в полученном биоугле из соломы использовали лазерный анализатор. На рисунке 4 представлен внешний вид частиц биоугля.

Распределение частиц по размерам представлено на рисунке 5. Анализ показал, что средний размер частиц (D_{50}) составляет 26,235 мкм, что соответствует

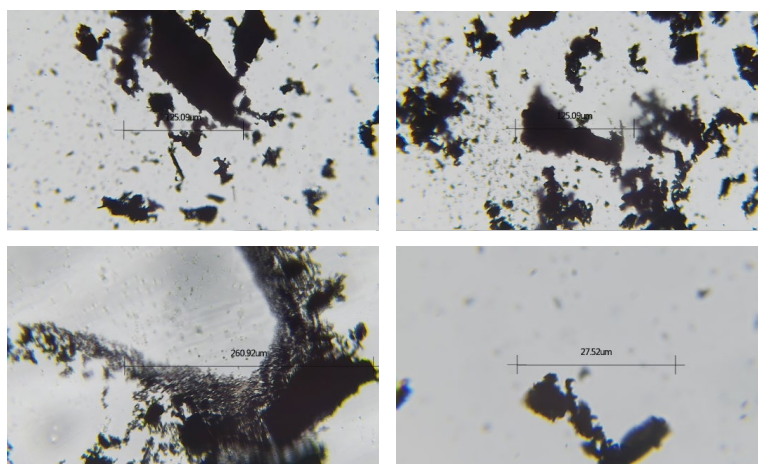


Рисунок 4. Внешний вид частиц в биоугле

Figure 4. Biochar particles

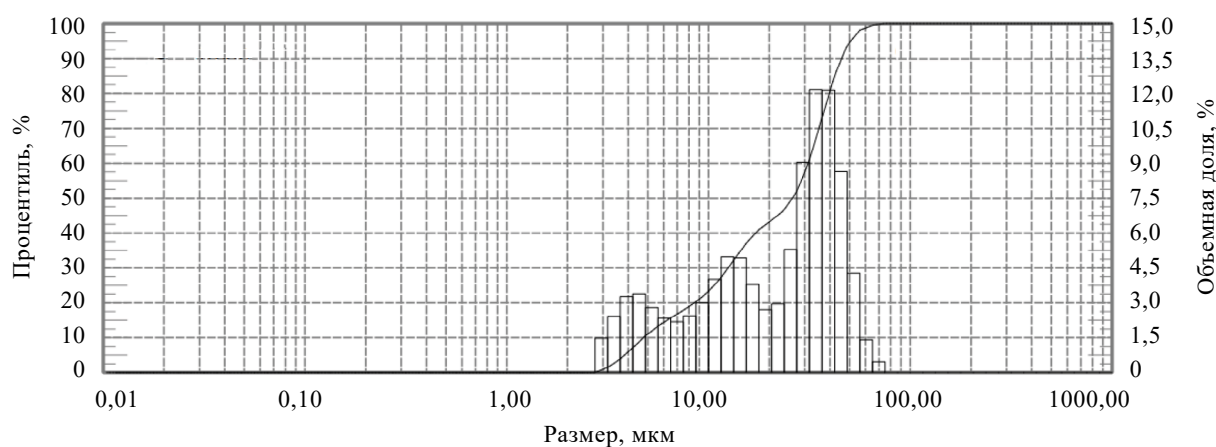


Рисунок 5. График встречаемости частиц в зависимости от их размера

Figure 5. Particle occurrence across sizes

стандартному диапазону значений частиц для работы с ЛИА (20,0–30,0 мкм). Полученный размер обеспечивает беспрепятственную диффузию ионов лития между электродами. Диапазон размеров частиц в биоугле варьируется от 4,759 до 45,342 мкм.

Сборку ЛИА осуществляли согласно схеме, представленной на рисунке 6. Первоначально подготавливали все компоненты для сборки: дно, сепаратор, спейсер, пружинку, крышку, раствор электролита, литиевый противозлектрод и анод с биоуглем. Все элементы помещали в анаэробный бокс. Процесс сборки проводили в среде аргона в перчаточном боксе серии Viliatek VBOX PRO (рис. 7). В качестве раствора электролита использовали раствор гексафторфосфата лития (LiPF₆) в смеси растворителей EC:DEC = 1:1. Литиевый противозлектрод изготавливали нанесением лития на фольгу в условиях заполненности форкамеры инерт-

ным газом аргоном. Анод с биоуглем изготавливали по рецептуре, приведенной в таблице 5, с перемешиванием компонентов на магнитной мешалке в течение 8 ч. Затем смесь наносили слоем в 200 мкм на медную фольгу толщиной 12 мкм с помощью ракеля. Равномерно распределенную смесь высушивали при 80 °С не менее 30 мин. После сушки из полученного электрода вырубали диски нужного диаметра с помощью установки вырубki электродов.

В рамках работы проведено циклирование трех типов образцов ЛИА: первая и вторая группы батарей содержат экспериментальный анодный материал на основе биоугля, полученного путем карбонизации соломы озимой пшеницы; третья группа изготовлена с использованием коммерческого графита AGP-2. На рисунках 8–10 представлены графики для каждой батареи, отражающие удельную емкость, кулоновскую

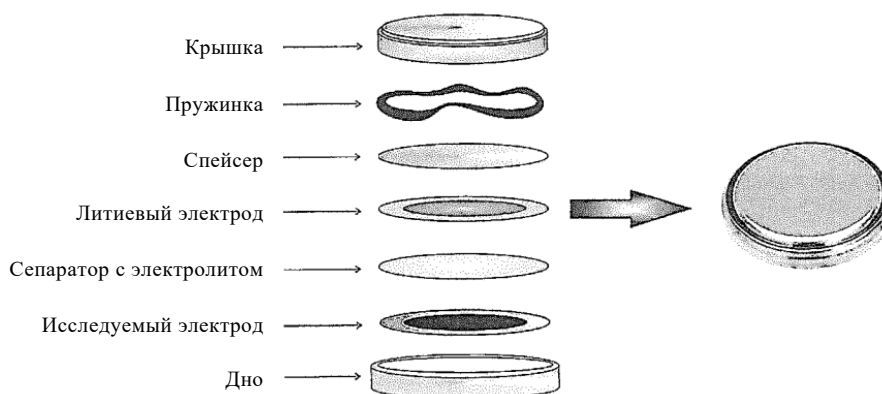


Рисунок 6. Схема сборки литий-ионного аккумулятора

Figure 6. Lithium-ion battery: Assembly diagram

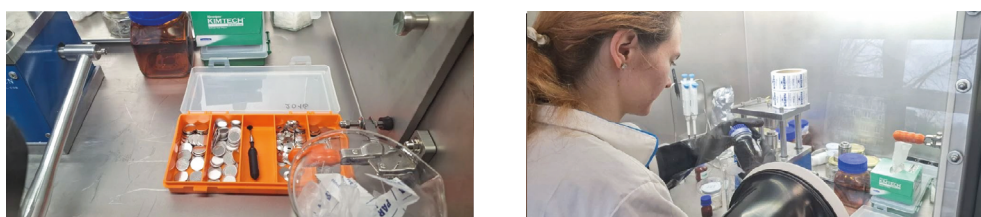


Рисунок 7. Процесс сборки литий-ионного аккумулятора

Figure 7. Assembling a lithium-ion battery

Таблица 5. Рецепт анода для литий-ионного аккумулятора

Table 5. Anode formulation for lithium-ion batteries

Вещество	Количество, г
Карбоксиметилцеллюлоза	0,9470
Высокопроводящий технический углерод	0,0341
Биоуголь	0,5000
H ₂ O	0,5000–0,8500
Стирол-бутадиеновый каучук	0,0497

эффективность и потенциал-емкостную кривую. Различия между кривыми определяются не только природой активного материала, но и тем, что основная часть данных относится к самым ранним циклам, когда максимально проявляются необратимые потери лития, структурная релаксация электрода и образование твердого защитного межфазного слоя (Solid Electrolyte Interphase, SEI) на отрицательном электроде в результате разложения электролита уже во время самого первого цикла заряда.

Для аморфного углерода характерно хранение лития одновременно на поверхностных дефектных центрах, в неупорядоченных псевдографитных доменах и в нанопорах, поэтому его потенциал-емкостная кривая обычно имеет выраженную наклонную область и заметный гистерезис между литированием и делитированием. Для графита, напротив, характерны относительно четкие плато, которые связаны со стадийной интеркаляцией лития в слоистую структуру, при этом поведение на пер-

вом цикле обычно более предсказуемо по форме, однако также сопровождается образованием SEI. На рисунке 8 представлены графики циклирования для образцов первой группы, содержащих биоуголь на аноде.

График изменения удельной емкости (рис. 8а) показывает, что на первом цикле наблюдается anomalously высокая разрядная емкость по сравнению с последующими циклами. Это свидетельствует о значительном вкладе необратимых процессов первого цикла, прежде всего связанных с формированием SEI и захватом части лития в дефектной структуре аморфного углерода. Последующие точки расположены значительно ниже первого цикла, но сохраняются на уровне, сопоставимом с графитовым контрольным образцом или превышают его. Такая картина означает, что начальная экстремально высокая емкость не должна интерпретироваться как полностью полезная обратимая емкость материала: существенная ее часть расходуется на сопутствующие процессы формирования интерфейса,

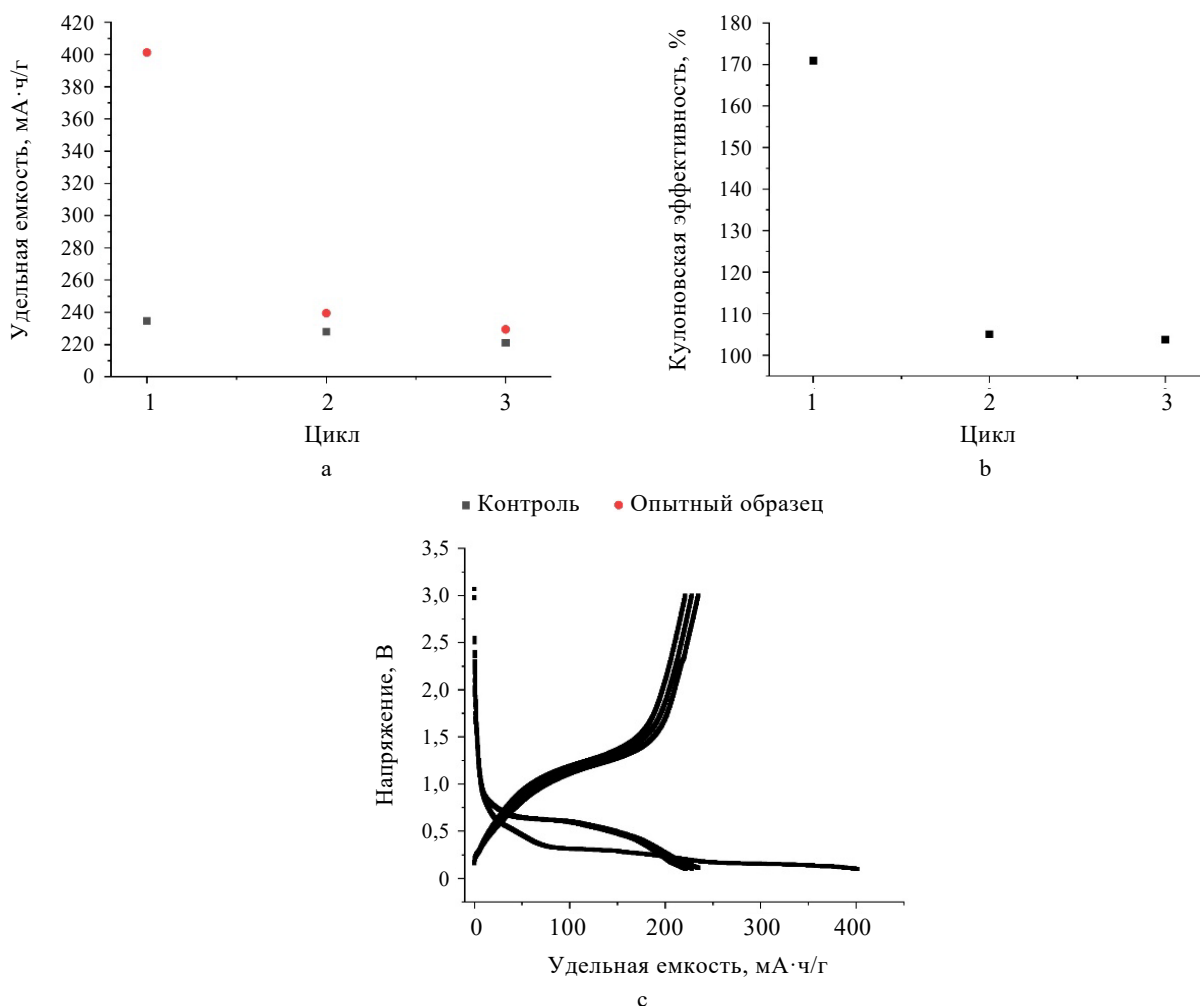


Рисунок 8. Исследование образцов литий-ионного аккумулятора первой группы, содержащих биоуголь: а – изменение удельной емкости; б – кулоновская эффективность батарей; с – потенциал-емкостная кривая

Figure 8. Electrochemical performance of group 1 lithium-ion cells containing biochar: a – specific capacity dynamics; b – coulombic efficiency; and c – galvanostatic charge-discharge profiles

однако остаточная обратимая емкость после стабилизации выглядит перспективной для дальнейшей оптимизации состава электрода и электролита.

Кулоновская эффективность (рис. 8b) демонстрирует аномально высокое значение на первом цикле с последующей стабилизацией вблизи 100 %. С точки зрения физики аккумулятор не может работать с эффективностью выше 100 %, поэтому полученные данные на начальном цикле связаны с методическими особенностями: погрешностью измерений, неточной настройкой прибора или вычислительной ошибкой. Из графика следует, что наиболее интенсивные необратимые и переходные процессы происходят на первом цикле, в то время как дальнейшая работа системы отличается стабильностью. Для экспериментального анода это объясняется интенсивным формированием SEI на его поверхности на начальной стадии; после завершения ее формирования межфазная граница между электродом и электролитом стабилизируется.

Приведенный график зависимости напряжения от емкости (рис. 8c) имеет широкую наклонную область и выраженное расхождение между ветвями заряда и разряда. Это поведение типично для аморфного углерода или углеродных материалов типа hard-carbon, где литий заполняет не строго упорядоченные места, а различные структурные элементы: трещины, дефекты, микропоры и локально упорядоченные углеродные участки. Именно поэтому кривая характеризуется не четкими графитовыми плато, а плавным наклоном с областью накопления заряда при низком напряжении. Высокая емкость на первом цикле хорошо согласуется с тем, что при очень низком токе силой 0,0001 А литий успевает проникать в труднодоступные центры хранения, тогда как на более высоких токах такой материал обычно проявляет меньшую кинетическую устойчивость и большую нестабильность профиля. Графики для второго образца с биоуглем представлены на рисунке 9.

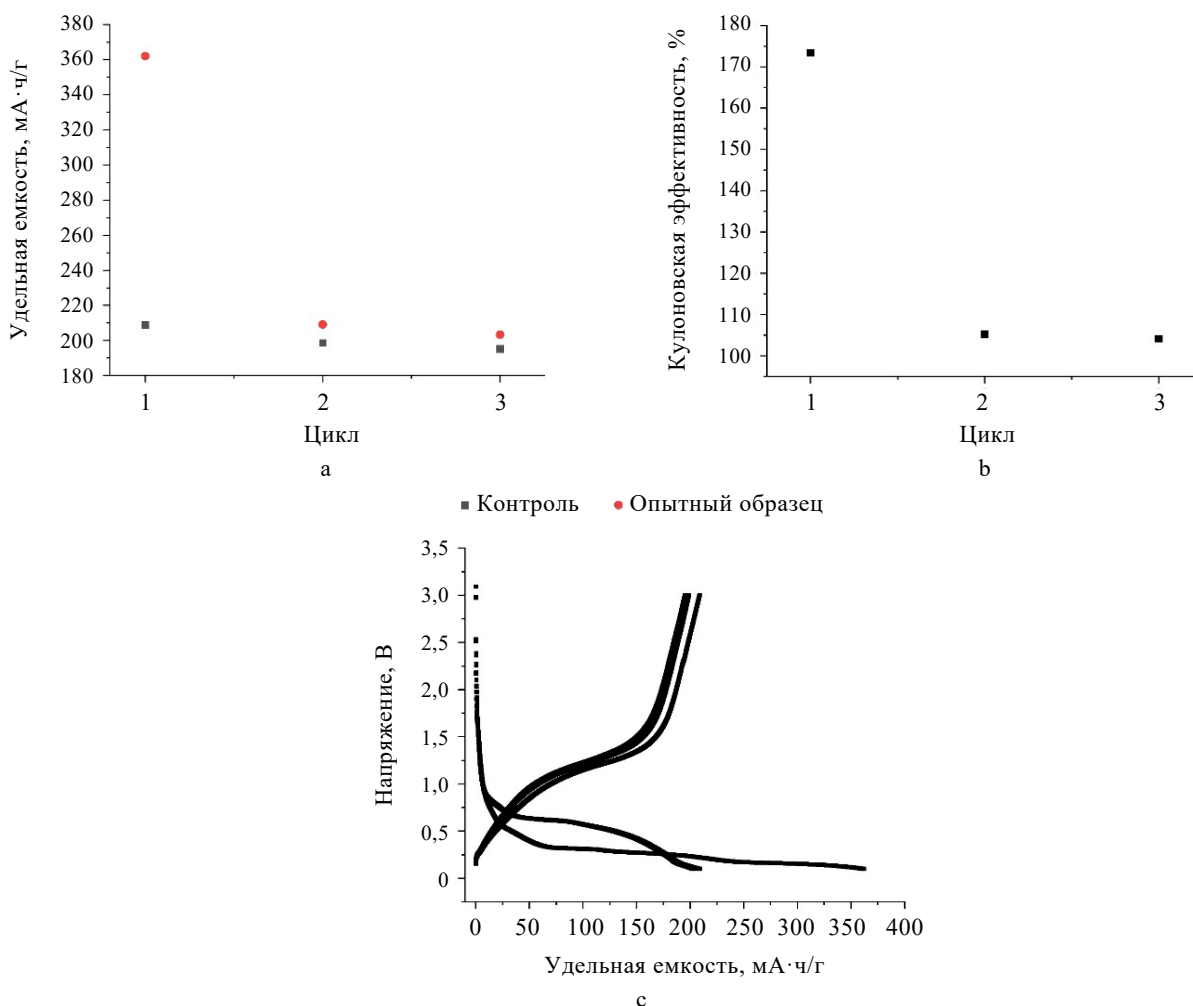


Рисунок 9. Исследование образцов литий-ионного аккумулятора второй группы, содержащих биоуголь: а – изменение удельной емкости; б – кулоновская эффективность батареи; с – потенциал-емкостная кривая

Figure 9. Electrochemical performance of group 2 lithium-ion cells containing biochar: a – specific capacity dynamics; b – coulombic efficiency; and c – galvanostatic charge-discharge profiles

График зависимости емкости образца (рис. 9а) качественно повторяет поведение первого элемента: первый цикл дает завышенную по сравнению со стабилизированным режимом емкость, после чего наблюдается резкое снижение значений и переход к более узкому диапазону. Это подтверждает единство механизмов работы анодов в обеих экспериментальных группах батарей.

Кулоновская эффективность элемента (рис. 9б) демонстрирует тот же характер: сильная аномалия на первом цикле и последующая стабилизация к 100 %. Такая воспроизводимость между двумя экспериментальными группами образцов свидетельствует о том, что наблюдаемое явление обусловлено либо спецификой первого цикла для данного типа анода, либо единым способом расчета и регистрации данных, а не со случайной особенностью отдельной ячейки. Потенциал-емкостная кривая образца (рис. 9с) практически идентична кривой элемента 1 и подтверждает, что экспериментальный материал функционирует по механизму, отличному от классического графита. Плавный наклон кривой указывает на заполнение литием различных энергетических позиций, в отличие от строго определенных мест в образце с графитом. Заметная петля гистерезиса между зарядом и разрядом характерна для неупорядоченных углеродных материалов. Данный гистерезис возникает вследствие различий в скоростях заполнения и освобождения пор, структурной неоднородности материала, наличия слабо упорядоченных участков, а также перестройки поверхностной структуры электрода после первого цикла.

В отличие от экспериментального биоугля, промышленный графит (рис. 9а) характеризуется заметно меньшей удельной емкостью, причем это различие особенно выражено на первом цикле. При этом скорость падения емкости графита от цикла к циклу значительно ниже, чем у анода из биоугля, что свидетельствует о меньших необратимых потерях и большей предсказуемости коммерческого материала. Преимущество графита заключается не в высокой начальной емкости, а в воспроизводимости характеристик, лучшей кинетике при рабочих токах и более управляемом профиле деградации по сравнению с высокодефектным аморфным углеродом.

График кулоновской эффективности (рис. 9с) также демонстрирует аномально высокое значение на первом цикле с последующей стабилизацией на уровне около 100 %. Аналогичная аномалия наблюдается и для графитового контрольного образца, следовательно, превышение 100 % не может служить как аргумент в пользу более высокой истинной кулоновской эффективности экспериментального материала. По-видимому, в данных присутствует общий артефакт расчета или регистрации. При этом сама тенденция к стабилизации после первого цикла сохраняет интерпретационную ценность: она указывает на то, что как для графита, так и для экспериментального углерода первый цикл

является этапом формирования устойчивой межфазной структуры, после которого поведение системы приближается к обратимому режиму. Результаты исследования циклирования образца батареи с коммерческим графитом представлены на рисунке 10.

Потенциал-емкостная кривая образца с коммерческим графитом (рис. 10с) существенно отличается от экспериментальных образцов более компактной формой по оси емкости и наличием выраженных платообразных участков. Это соответствует механизму стадийной интеркаляции лития в графит, при котором заполнение межслоевых пространств происходит через последовательные фазовые состояния, а не через широкий набор дефектных состояний. Именно поэтому графитовый образец характеризуется меньшей суммарной емкостью, но при этом более структурированной и предсказуемой формой кривой. Сопоставление с экспериментальными образцами позволяет заключить, что основное различие в форме зарядных кривых – степень структурной упорядоченности углеродного материала: чем выше степень беспорядка, пористость и разнообразие локальных состояний, тем более наклонной, растянутой и гистерезисной становится кривая.

Совокупность полученных графиков показывает, что экспериментальный анодный материал обеспечивает более высокую стартовую удельную емкость в мягком токовом режиме, однако значительная часть этого преимущества на первом цикле обусловлена формированием SEI и другими необратимыми процессами. Поэтому корректнее говорить не о превосходной электрохимической эффективности, а о повышенной исходной способности к накоплению лития в сочетании с большей необратимостью и, вероятно, меньшей устойчивостью при повышенных токах.

Графит AGP-2, напротив, характеризуется меньшей емкостью, но при этом более типичным и предсказуемым поведением. Различия в форме зарядных кривых указывают на принципиально разные механизмы хранения лития: в графите ионы лития внедряются между упорядоченными слоями в строго определенных позициях, тогда как в экспериментальном аноде литий распределяется по доступным трещинам, порам и дефектам.

Выводы

Масштабирование сельскохозяйственной отрасли приводит к увеличению объемов отходов в виде соломы, традиционные методы утилизации которой наносят значительный экологический ущерб планете. Параллельно с этим интенсификация производства литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) сопровождается ростом спроса на невозобновляемые минеральные ресурсы и увеличением объемов выбросов парниковых газов в ходе изготовления анодных материалов.

В целях решения обозначенных экологических и ресурсных проблем сформулирована гипотеза о возможности использования соломы пшеницы в качестве

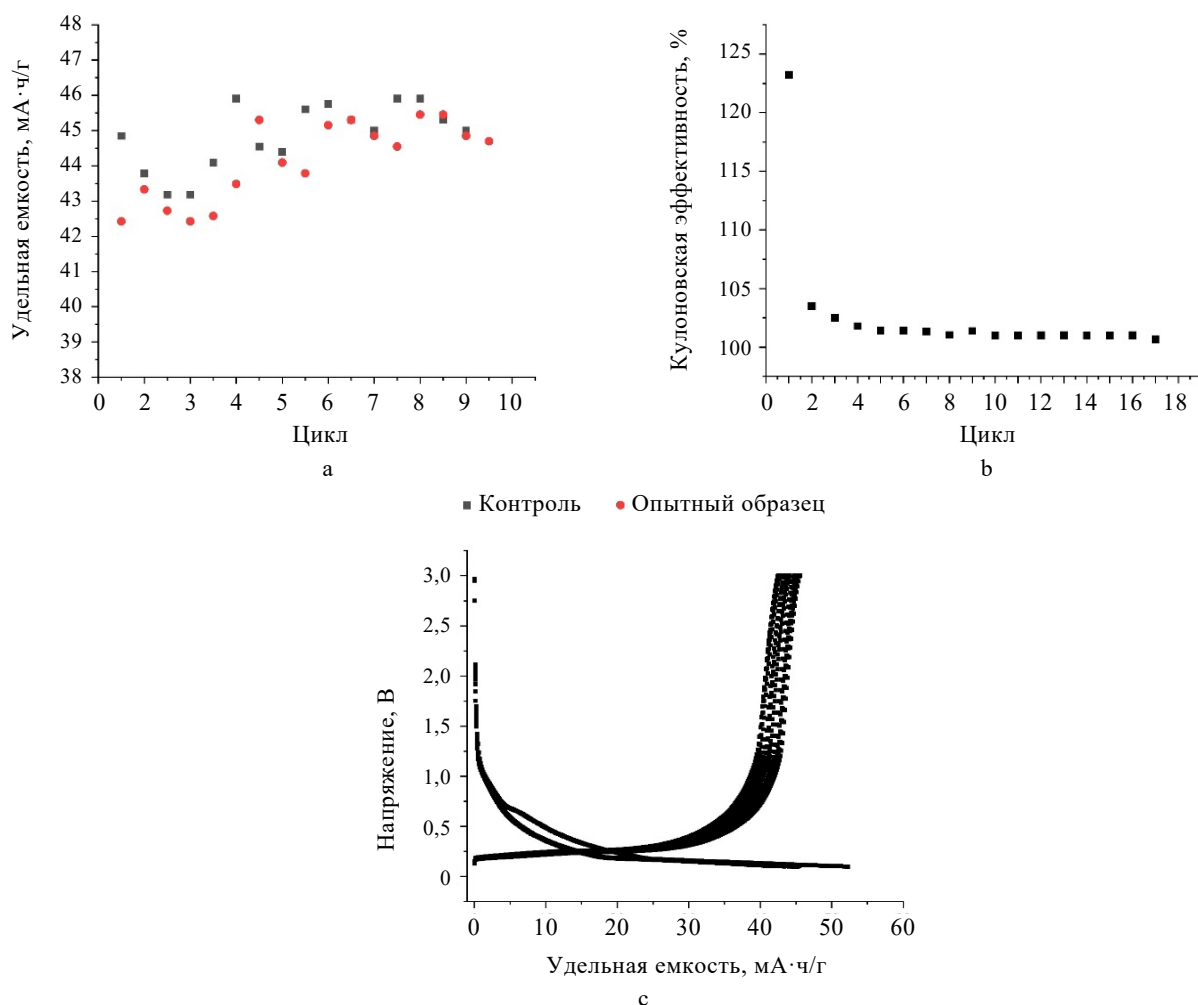


Рисунок 10. Исследование образцов литий-ионного аккумулятора третьей группы, содержащих биоуголь: а – изменение удельной емкости; б – кулоновская эффективность батареи; с – потенциал-емкостная кривая

Figure 10. Electrochemical performance of group 3 lithium-ion cells containing biochar: а – specific capacity dynamics; б – coulombic efficiency; and с – galvanostatic charge-discharge profiles

прекурсора для получения биоугля с последующей интеграцией полученного углеродного материала в состав анодных электродов ЛИА.

Результаты элементного состава соломы озимой пшеницы показали высокое содержание общего углерода (44,2 % от сухой массы), что подтверждает перспективность данного сырья для углеродной конверсии. Для переработки выбрана методика гидротермальной карбонизации как наиболее технологически и экологически оптимальная. Опытным путем установлены оптимальные условия карбонизации: температура реакционной среды 260 °С, продолжительность нагревания 60 мин и гидромодуль 1:12 (сухое вещество:вода). На выходе массовая доля углерода в биоугле возросла до 61,33 %. Для улучшения структурно-пористых характеристик и повышения содержания углерода в готовом продукте биоуголь подвергали многостадийному пиролизу, по завершении которого концентрация углерода в конечном продукте достигала 80–95 %.

Для эффективного использования в ЛИА углеродный материал должен обладать развитой системой межчастичных каналов для ионов лития. Анализ распределения частиц показал средний размер (26,235 мкм), что соответствует стандартам и подтверждает способность биоугля формировать эффективную перколяционную сеть.

На основе разработанного биоугля изготовлен анод, на котором собран ЛИА и проведен анализ циклирования в сравнении с коммерческим образцом. Исследование показало, что опытный образец обладает высокой стартовой емкостью за счет аморфной структуры (заполнение пор и дефектов), однако характеризуется пониженной стабильностью, значительными необратимыми потерями на формирование твердого защитного межфазного слоя и меньшей устойчивостью при повышенных токах.

Таким образом, использование возобновляемого сырья в виде соломы озимой пшеницы в производстве

адонов для ЛИА представляет перспективную область, требующую дальнейших исследований. Данный подход позволит реализовать замкнутый углеродный цикл в рамках концепции циркулярной экономики. Переработка сельскохозяйственных отходов в высокотехнологичные углеродные структуры не только минимизирует экологическую нагрузку на агропромышленные территории, но и существенно снижает совокупный углеродный след индустрии накопителей энергии.

Критерии авторства

Н. А. Муравьева – подготовка первоначального текста статьи, проведение экспериментов, сбор данных. Н. Ю. Наветный, Д. А. Полыньёв – проведение экспериментов, сбор данных, создание графиков, схем, иллюстраций. Е. В. Примаченко – статистический и теоретический анализ данных, редактирование и доработка текста. Я. А. Масютин – предоставление материалов, оборудования, финансирования. М. Ирфан –

проверка результатов на воспроизводимость, научное руководство проектом.

Contribution

N.A. Muravieva drafted the manuscript, conducted the experiments, and collected the data. N.Yu. Navetnykh and D.A. Polynev conducted the experiments, collected the data, and provided the visualization. E.V. Primachenko performed the statistical analysis, wrote the review, and proofread the manuscript. Ya.A. Masyutin provided the research materials, equipment, and funding. M. Irfan verified the results and supervised the project.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest..

Список литературы / References

1. Роньжина Е. С. Озимая и яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) в агроклиматических условиях Калининградской области. Известия КГТУ. 2018. № 51. С. 100–110. [Ronzhina ES. Winter and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in agro-climatic conditions of the Kaliningrad region. Proceedings of KSTU. 2018;(51):100–110. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/VKJZKN>
2. Богатырева Е. Н., Серая Т. М., Бирюкова О. М., Кирдун Т. М., Белявская Ю. А. и др. Коэффициент пересчета зерна и семян в побочной продукции и содержание основных элементов питания в побочно продукции сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь. Почвоведение и агрохимия. 2016. № 2. С. 78–89. [Bogatyreva EN, Seraya TM, Biryukova OM, Kirdun TM, Belyavskaya YuA, et al. The conversion factor for grain and seeds in by-products and the content of key nutrients in by-products of agricultural crops in the Republic of Belarus. Soil Science and Agrochemistry. 2016;(2):78–89. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YQILAT>
3. Xing X, Zhou Y, Lang J, Chen D, Cheng S, et al. Spatiotemporal variation of domestic biomass burning emissions in rural China based on a new estimation of fuel consumption. Science of the Total Environment. 2018;626:274–286. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.048>
4. Самсонова Н. Е. Использование соломы в качестве органического удобрения. Смоленск: Смоленская государственная сельскохозяйственная академия, 2014. 16 с. [Samsonova NE. Using straw as an organic fertilizer. Smolensk; Smolensk State Agricultural Academy, 2014. 16 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/YWOGKT>
5. Qiao YQ, Cao CF, Zhao Z, Du SZ, Zhang YL, et al. Effects of straw returning and N fertilizer application on yield, quality and occurrence of *Fusarium* head blight of wheat. Journal of Triticeae Crops. 2013;33:727–731.
6. Тарабанько В. Е., Коропачинская Н. В., Кудряшев А. В., Первышина Е. П., Кузнецов Б. Н. и др. Исследование процесса переработки пшеничной соломы в ароматические альдегиды и левулиновую кислоту. Химия растительного сырья. 1998. № 3. С. 59–64. [Tarabanko VE, Koropachinskaya NV, Kudryashev AV, Pervyshina EP, Kuznetsov BN, et al. Study of the process of processing wheat straw into aromatic aldehydes and levulinic acid. Chemistry of Plant Raw Materials. 1998;(3):59–64. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HYSSHP>
7. Santulli C. The use of wheat straw as an agricultural waste in composites for semi-structural applications. In: Thakur VK, Thakur MK, Kessler MR, editors. Handbook of Composites from Renewable Materials. 2017. p. 515–531. <https://doi.org/10.1002/9781119441632.ch38>
8. Shafaet A, Srinivas J, Madhav Y. Biodegradable films from the lignocellulosic fibers of wheat straw biomass and the effect of calcium ions. International Journal of Biological Macromolecules. 2024;264(1):130601. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130601>
9. Zhang L, Jiang J, Holm N, Chen F. Mini-chunk biochar supercapacitors. Journal of Applied Electrochemistry. 2014; 44(10):1145–1151. <https://doi.org/10.1007/s10800-014-0726-7>
10. Seroka N, Luo H, Khotseng L. Biochar-derived anode materials for lithium-ion batteries: A review. Batteries. 2024; 10:144. <https://doi.org/10.3390/batteries10050144>
11. Shi Z, Jin Y, Han T, Yang H, Gond R, et al. Bio-based anode material production for lithium-ion batteries through catalytic graphitization of biochar: The deployment of hybrid catalysts. Scientific Reports. 2024;14:3966. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54509-8>

12. Manyà J, Gascó G. Biochar as a sustainable resource to drive innovative green technologies. In: Manyà JJ, Gascó G, editors. Biochar as a renewable-based material: With applications in agriculture, the environment and energy. New Jersey: World Scientific Publishing Europe Ltd.; 2021. pp. 1–33.
13. Kane S, Storer A, Xu W, Ryan C, Stadie NP. Biochar as a renewable substitute for carbon black in lithium-ion battery electrodes. ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 2022;10(37):12226–12233. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02974>
14. Трешкина Ю. И., Крюков А. Ю., Самодуров А. А., Братков И. В., Десятов А. В. Сферический графит для анодов литий-ионных аккумуляторов. Успехи в химии и химической технологии. 2024. Т. 38. № 8. С. 112–115. [Treshkina YuI, Kruykov AYU, Samodurov AA, Bratkov IV, Desyatov AV. Spherical graphite for lithium-ion battery anodes. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2024;38(8):112–115. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/MLWBTO>
15. Kulkarni S, Huang T, Thapaliya B, Luo H, Dai S, *et al.* Prospective life cycle assessment of synthetic graphite manufactured via electrochemical graphitization. ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 2022;10(41):13607–13618. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c02937>
16. Ding C, Gan Y, Cui Y, Luo J. Wheat straw biochar and its performance in treatment of phenanthrene containing water and microbial remediation of phenanthrene contaminated soil. Frontiers in Environmental Science. 2022;10:1039603. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1039603>
17. Vernardou D, Psaltakis G, Tsubota T, Katsarakis N, Kalderis D. Challenges and perspectives of biochar anodes for lithium-ion batteries. Future Batteries. 2024;4:100011. <https://doi.org/10.1016/j.fub.2024.100011>
18. Sarma H, Sun J, Hora Y, Forsyth M, Byrne N. Effect of carbonization behaviour of cotton biomass in electrodes for sodium-ion batteries. ChemElectroChem. 2023;10(14):e202300127. <https://doi.org/10.1002/celec.202300127>
19. Khan T, Saud A, Jamari S, Hasbi M, Rahim M, *et al.* Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for carbon rich material preparation: A review. Biomass and Bioenergy. 2019;130:105384. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105384>
20. Харина М. В., Терехова Л. М., Емельянов В. М. Состав, структура и перспективы энергоресурсосберегающей переработки соломы злаковых культур. Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 24. С. 168–174. [Kharina MV, Terekhova LM, Emelyanov VM. Composition, structure and prospects for energy- and resource-saving processing of cereal straw. Bulletin of Kazan Technological University. 2014;17(24):168–174. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TNHJKR>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Муравьева Наталья Александровна / Natalia A. Muravieva ORCID 0000-0001-7783-5143; eLIBRARY SPIN 6916-6936
Наветный Никита Юрьевич / Nikita Yu. Navetnykh
Полыньёв Данила Алексеевич / Daniil A. Polynev ORCID 0009-0003-3101-4982
Примаченко Елизавета Васильевна / Elisaveta V. Primachenko ORCID 0009-0005-2209-1657; eLIBRARY SPIN 3727-3240
Масютин Яков Андреевич / Yakov A. Masyutin ORCID 0000-0003-4347-3425; eLIBRARY SPIN 2467-9765
Ирфан Мухамед / Muhammad Irfan ORCID 0000-0003-2955-4237