

Обзорная статья

УДК 54.052:54.057:542.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-162-172

АКТИВИРОВАННЫЕ УГЛИ ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОТХОДОВ: СОСТАВ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА (обзор)

Е.В. Сивенкова^{1,2}, Р.Ю. Новоторцев², А.В. Славин¹, Д.Д. Кречетов¹, С.В. Савилов^{1,2}

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

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Москва, Россия; dekanat@chem.msu.ru

Аннотация. Представлен сравнительный анализ методов синтеза и физико-химических свойств активированных углей и высокопроводящей сажи из возобновляемой биомассы (рисовой шелухи, лигносульфоната натрия) и отходов целлюлозно-бумажного производства. Показано, что активация гидроксидом, карбонатом и гидрокарбонатом калия позволяет получать угли с удельной поверхностью до 3050 м²/г для применения в качестве электродных материалов суперконденсаторов. Показана перспектива использования высокопроводящей сажи в электропроводящих покрытиях и в качестве армирующего наполнителя шин и наполненных пластиков.

Ключевые слова: активированный уголь, биомасса, лигносульфонат натрия, угли из рисовой шелухи, карбонат и гидрокарбонат калия, суперконденсатор, токопроводящая сажа

Для цитирования: Сивенкова Е.В., Новоторцев Р.Ю., Славин А.В., Кречетов Д.Д., Савилов С.В. Активированные угли из возобновляемой растительной биомассы и производственных отходов: состав, структура, свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2026. № 9 (163). С. 162–172. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-162-172.

Review article

ACTIVATED CARBON FROM RENEWABLE PLANT BIOMASS AND INDUSTRIAL WASTE: COMPOSITION, STRUCTURE, PROPERTIES (review)

E.V. Sivenkova^{1,2}, R.Yu. Novotortsev², A.V. Slavin¹, D.D. Krechetov¹, S.V. Savilov^{1,2}

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

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dekanat@chem.msu.ru

Abstract. A comparative analysis is presented regarding the synthesis methods and physico-chemical properties of activated carbons and highly conductive carbon black derived from renewable biomass (rice husks, sodium lignosulfonate) and pulp and paper industry waste. It is demonstrated that activation with potassium hydroxide, carbonate, or bicarbonate yields carbons with specific surface areas of up to 3050 m²/g, suitable for use as electrode materials in supercapacitors. The potential for using highly conductive carbon black in electrically conductive coatings and as a reinforcing filler for tires and filled plastics is also highlighted.

Keywords: activated carbon, biomass, sodium lignosulfonate, rice husk charcoal, potassium carbonate and bicarbonate, supercapacitor, carbon black

For citation: Sivenkova E.V., Novotortsev R.Yu., Slavin A.V., Krechetov D.D., Savilov S.V. Activated carbon from renewable plant biomass and industrial waste: composition, structure, properties (review). *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (163), pp. 162–172. Available at: <http://www.journal.viam.ru>. DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-9-162-172.

Введение

В настоящее время особое внимание привлекают возобновляемые природные ресурсы и экологически безопасные технологии их переработки с целью получения важных для промышленности веществ. Критерий эффективного малоотходного производства – полное использование компонентов исходного сырья. Переработка углеродсодержащего сырья, получаемого из биомассы, является одним из наиболее перспективных подходов к получению функциональных материалов. Актуальность исследований в данной области связана с необходимостью создания активированных углей для многих отраслей из возобновляемых растительных сельскохозяйственных источников и промышленных отходов целлюлозно-бумажных производств [1].

В авиастроении углеродные материалы из биомассы и производственных отходов могут находить применение благодаря их уникальным физико-химическим свойствам, низкой плотности (или массе) и технологичности [1]. Одна из ключевых областей применения таких материалов – авиационные лакокрасочные материалы, в частности защитные покрытия, предназначенные для снятия статического электричества с внешних поверхностей деталей из полимерных композиционных материалов для современных изделий авиационной техники [2–4]. Введение углеродных компонентов в качестве модифицирующих добавок потенциально способно расширить отечественную сырьевую базу подобных материалов и одновременно снизить привес покрытия по сравнению с покрытиями, содержащими металлические порошки [2]. Формирование барьерного эффекта при введении углеродных и минеральных частиц в полимерные матрицы препятствует проникновению влаги и агрессивных химических реагентов к защищаемой поверхности, что критически важно для фюзеляжей и конструктивных элементов воздушных судов [5, 6]. Помимо самих углей, побочные продукты переработки биомассы, такие как получаемый из золы диоксид кремния, также рассматриваются как реологические модификаторы для лакокрасочной промышленности [7]. Систематизация подходов к применению неметаллических функциональных наполнителей, в том числе получаемых из возобновляемого природного сырья, также рассматривается применительно к антифрикционным покрытиям авиационного назначения [8].

Другое важное направление для развития современной техники – создание автономных источников тока. Переработка растительной биомассы позволяет получать высокоэффективные электродные материалы для таких устройств хранения энергии, как суперконденсаторы, литий-ионные аккумуляторы и проточные батареи [9]. Карбонизация сырья с последующей физической и химической активацией дает возможность формировать трехмерные пористые структуры с высокоразвитой поверхностью. Введение гетероатомов в подобные структуры изменяет электронные свойства материала и увеличивает число активных центров, участвующих в обратимых окислительно-восстановительных реакциях, что способствует эффективному накоплению заряда в автономных источниках тока [9]. В рамках данного обзора в качестве перспективных прекурсоров и функциональных углеродных материалов рассматриваются три основных объекта: угли из рисовой шелухи, угли из лигносульфоната натрия и высокопроводящая сажа, полученная высокотемпературной карбонизацией лигнино-углеводного сырья.

Цель работы – систематизация современных данных о составе, особенностях формирования структуры и физико-химических свойствах активированных углей и высокопроводящих саж, получаемых из возобновляемой биомассы и производственных

отходов. Основная задача работы заключается в комплексном анализе взаимосвязи между исходным сырьем, условиями его термической и химической модификации и эксплуатационными характеристиками конечных углеродных материалов. Рассмотрены перспективы их практического применения в авиационной отрасли, в производстве лакокрасочных материалов, наполненных пластиков и электродных компонентов автономных источников тока.

Несмотря на различие в химической природе рассматриваемых прекурсоров, для большинства из них применяется общая методологическая схема получения пористых углеродных материалов, включающая стадию термической карбонизации сырья в инертной атмосфере и последующую химическую активацию (см. рисунок) [10–12]. Варьирование параметров данной схемы позволяет менять итоговые текстурные характеристики и область практического применения получаемого материала.



Обобщенная двухстадийная схема получения активированных углей из растительной биомассы: карбонизация с последующей химической активацией гидроксидом калия [10–12]

Угли из рисовой шелухи

Рисовая шелуха является крупнотоннажным сельскохозяйственным отходом. Ежегодное мировое производство риса-сырца превышает 700 млн т, а рисовая шелуха составляет ~20 % массы зерна, что делает данное сырье одним из наиболее доступных возобновляемых источников углерода [11]. Шелуха состоит преимущественно из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и минеральной золы. Синтез функциональных материалов из данного вида сельскохозяйственных отходов базируется на разделении органической и неорганической фаз. Содержание основных химических компонентов может варьироваться в широких пределах в зависимости от сорта риса и региона его произрастания [7].

Согласно данным низкотемпературной адсорбции азота, приведенным в работе [7], образцы аморфного кремнезема, полученные термическим способом из рисовой шелухи, характеризуются удельной поверхностью 230–479 м²/г и средним диаметром пор 3,9–4,4 нм. Для сравнения: образцы кремнезема, выделенные из соломы риса, характеризуются меньшей удельной поверхностью (8,6–102 м²/г) и более широким распределением пор по размерам (9,9–85,7 нм), что указывает на определяющее влияние вида сырья и способа его переработки на текстурные параметры конечного продукта. Таким образом, рисовая шелуха – перспективное сырье для получения материалов с развитой удельной поверхностью, в том числе сорбентов.

В процессе карбонизации органических компонентов рисовой шелухи происходит образование гидрофобных продуктов пиролиза – углей, изменяющих свойства поверхности получаемой золы. Варьируя температурный режим и продолжительность

термообработки, можно получать продукт пиролиза с заданной гидрофобностью и сорбционными свойствами. Так, согласно данным работы [13], карбонизация рисовой шелухи при 750 °С с последующей химической активацией гидроксидом калия при 850 °С позволяет увеличить удельную поверхность материала до 3050 м²/г. При этом доля графитизированного углерода в структуре превышает 15 % согласно данным рентгеновской дифракции и рамановской спектроскопии. Аналогичные результаты получены для двухстадийного процесса карбонизации рисовой шелухи с последующей активацией КОН в атмосфере азота. В работе [10] установлено, что активация позволяет достичь удельной поверхности материала 2700 м²/г и общего объема пор 1,54 см³/г. Электрохимическое тестирование таких активированных углей в трехэлектродных ячейках с электролитами 1 М Na₂SO₄ и 1 М Na₂SO₄ с добавлением 0,03 М K₃Fe(CN)₆ продемонстрировало существенный прирост удельной емкости за счет дополнительного псевдоемкостного вклада окислительно-восстановительной пары [Fe(CN)₆]³⁻/[Fe(CN)₆]⁴⁻, что указывает на перспективность применения полученных материалов в качестве электродов суперконденсаторов [10]. Дополнительным подтверждением эффективности активации рисовой шелухи при помощи КОН служат данные работы [14]. Активация гидроксидом калия обеспечивает формирование развитой пористой структуры с удельной поверхностью до 2363,7 м²/г, что превышает значения для активированных углей из подсолнечной (786,1 м²/г) и соевой (642,4 м²/г) лузги, полученных в тех же условиях [14]. Обобщенные данные по текстурным характеристикам активированных углей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Текстурные характеристики активированных углей из рисовой шелухи и других агропромышленных отходов при разных условиях синтеза [10, 13, 14]

Прекурсор, метод получения	Температура карбонизации/активации, °С	Удельная поверхность $S_{уд}$, м ² /г	Объем пор $V_{пор}$, см ³ /г	Литературный источник
Рисовая шелуха, карбонизация без активации	750	210	–	[13]
Рисовая шелуха + КОН	850	3050	–	[13]
Рисовая шелуха, двухстадийная карбонизация + КОН	700–900	2700	1,54	[10]
Рисовая шелуха + КОН	600–750	2363,7	–	[14]
Лузга подсолнечника + КОН	800	786,1	–	[14]
Соевая лузга + КОН	800	642,4	–	[14]

Наряду с гидроксидом калия в качестве активирующего агента для рисовой шелухи и других видов биомассы рассматриваются карбонат и гидрокарбонат калия, которые при термическом разложении также генерируют оксид калия и газообразные продукты, обеспечивающие формирование пористой структуры. Однако при этом такие активаторы менее агрессивны по отношению к технологическому оборудованию. Показано, что предварительная пропитка рисовой шелухи 10%-ным раствором K₂CO₃ перед последующей активацией повышает удельную поверхность активированного угля до 2556,8 м²/г и данный материал демонстрирует удельную емкость электрода 325 Ф/г [15].

Активированные угли из лигносульфоната натрия

Лигносульфонаты представляют собой водорастворимые сульфопроизводные лигнина, образующиеся в качестве побочного продукта сульфитной варки целлюлозы. Ежегодный объем образования лигнина и лигносульфонатов при переработке древесины оценивается в ~70 млн т, при этом их утилизация в высокотехнологичные продукты остается ограниченной, что приводит к потерям углеродсодержащего сырья и создает экологическую нагрузку на окружающую среду [16]. Лигносульфонаты характеризуются высоким содержанием углерода и ароматических структурных единиц, что, с одной стороны, усложняет их переработку в индивидуальные низкомолекулярные соединения, а с другой – делает их привлекательным прекурсором для получения пористых углеродных материалов, поскольку ароматический каркас лигнина склонен к формированию термостабильных углеродных структур уже на стадии карбонизации.

Химическая активация карбонизированного лигносульфоната натрия позволяет синтезировать углеродные структуры с высокой удельной площадью поверхности. Так, в работе [12] для гидротермально обработанного лигносульфоната натрия проведена активация гидроксидом калия с последующим отжигом. В результате получен материал с удельной поверхностью $2717 \text{ м}^2/\text{г}$ при умеренной доле мезопор, что обеспечивает благоприятные условия для транспорта ионов электролита [12]. В работе [16] при использовании борной кислоты в качестве темплата, промотирующего образование мезопор в ходе пиролиза, и активации КОН получен пористый углерод с удельной поверхностью $1588,4 \text{ м}^2/\text{г}$ и объемом пор $1,4 \text{ см}^3/\text{г}$, допированный гетероатомами азота, кислорода и серы. Материал продемонстрировал удельную емкость $318,3 \text{ Ф/г}$, что подтверждает вклад гетероатомных функциональных групп в псевдоемкостную составляющую заряда [16]. В работе [17] разветвленная структура углеродного материала получена при помощи предварительного сшивания макромолекул лигносульфоната глутаровым альдегидом и полиэтиленгликолем с последующей активацией КОН. Материал обладает удельной поверхностью $2780 \text{ м}^2/\text{г}$ и удельной электрической емкостью 305 Ф/г при плотности тока $0,5 \text{ А/г}$ в трехэлектродной системе [17].

Помимо натриевых лигносульфонатов, в качестве прекурсора активно исследуются и другие соли лигносульфоновой кислоты. Так, для аммонийного лигносульфоната в работе [18] проведена активация КОН при массовом соотношении активатор/прекурсор не более 0,75 и температуре карбонизации 900°C . В результате получены пористые углеродные материалы, допированные гетероатомами азота, кислорода и серы, с удельной поверхностью $>2000 \text{ м}^2/\text{г}$. Влияние температуры карбонизации и соотношения КОН к прекурзору для лигносульфоната натрия также систематически исследовано в научно-технической литературе. В работе [19] наилучшая морфология для серии образцов достигалась при температуре 800°C и соотношении щелочь/углерод, равном 1. При этом удельная поверхность составляла $1894,97 \text{ м}^2/\text{г}$, а удельная емкость в трехэлектродной системе достигала $217,5 \text{ Ф/г}$ при плотности тока $0,5 \text{ А/г}$. Сопоставление текстурных и электрохимических параметров активированных углей на основе лигносульфонатов приведено в табл. 2.

Помимо гидроксида калия, для активации лигнина и лигносульфонатов исследуется применение карбоната и гидрокарбоната калия. При сравнении калиевых активаторов для технического лигнина установлено, что использование карбоната калия обеспечивает большую удельную поверхность по сравнению с использованием гидроксида калия [20]. Обнаружено также, что активация карбонатом калия обеспечивает более высокую степень графитизации пористого углерода из ферментативного гидролизованного лигнина по сравнению с активацией гидроксидом калия в тех же условиях за счет иного механизма перегруппировки атомов углерода [21]. При активации крафт-лигнина карбонатом калия повышение температуры с 600 до 1000°C сопровождается снижением

выхода угля с 50,6 до 20,5 % при одновременном росте доли мезопор с 11,6 до 95,9 %, что позволяет целенаправленно регулировать соотношение микро- и мезопористости конечного материала, изменяя температурный режим активации [22]. Применимость гидрокарбонатной активации непосредственно к лигносульфонату натрия подтверждена и для рассмотренного ранее материала: использование нитрата и гидрокарбоната калия ($\text{KNO}_3\text{--KHC}\text{O}_3$) в качестве соактивирующей системы обеспечивает формирование иерархической пористой структуры с удельной поверхностью 2264,67 м²/г, легированной атомами серы и азота [16].

Таблица 2

Текстурные и электрохимические характеристики активированных углей на основе лигносульфоната

Прекурсор, метод модификации	Условия активации	Удельная поверхность $S_{\text{уд}}$, м ² /г	Удельная электрическая емкость $C_{\text{уд}}$, Ф/г (плотность тока)	Литературный источник
Лигносульфонат натрия, гидротермальная обработка	КОН, 750 °С	2717,0	154 (0,5 А/г)	[12]
Лигносульфонат натрия + борная кислота (темплат), допирование –N, –O, –S	КОН (1:1)	1588,4	318,3 (0,5 А/г)	[16]
Лигносульфонат натрия, сшивка глутаральдегидом + полиэтиленгликолем	КОН	2780,0	305 (0,5 А/г)	[17]
Аммонийный лигносульфонат, допирование –N, –O, –S	КОН (0,75:1), 900 °С	2406,0	250 (0,5 А/г), 197 (50 А/г)	[18]
Лигносульфонат натрия	КОН (1:1), 800 °С	1894,97	217,5 (0,5 А/г)	[19]

Высокопроводящая сажа из лигнино-углеводного сырья

В отличие от активированных углей, для которых определяющим параметром является максимально развитая пористая поверхность, для токопроводящих сажевых материалов ключевое значение имеет не текстура пор, а степень упорядоченности углеродной структуры и низкое электрическое сопротивление контакта между частицами. Формирование упорядоченных углеродных структур при высокотемпературном воздействии обеспечивает саже высокую электропроводность и позволяет использовать ее в токопроводящих композициях, в том числе в электродных пастах литий-ионных аккумуляторов и в электропроводящих лакокрасочных покрытиях [2, 23].

Процесс получения токопроводящих саж из лигнино-углеводного сырья включает высокотемпературный пиролиз и графитизацию в инертной атмосфере при температурах порядка 1200–2500 °С. Термическая обработка при столь высоких температурах приводит к практически полному удалению гетероатомов и формированию упорядоченных углеродных кристаллитов с высокой долей sp^2 -гибридизованных связей. Так, при графитизации лигниновых волокон при 1200 °С формируется материал с относительно низкой удельной поверхностью 89,9 м²/г, который тем не менее демонстрирует лучшие характеристики проводимости по сравнению с более пористыми, но менее упорядоченными образцами [20, 21]. Отсутствие развитой микропористой структуры и кислородсодержащих поверхностных групп минимизирует сопротивление переноса заряда на границе раздела частиц и обеспечивает материалу высокую электропроводность, что подтверждается данными рамановской спектроскопии. С ростом температуры графитизации и снижением содержания активирующего агента доля неупорядоченного углерода (полоса *D* при 1330–1361 см^{–1}) закономерно уменьшается относительно интенсивности графитоподобной полосы *G* (1580–1585 см^{–1}), что

выражается в снижении соотношения интенсивностей I_D/I_G [24, 25]. Поэтому для получения токопроводящих саж из лигнино-углеводного сырья не проводят химическую активацию, характерную для синтеза сорбционно-активных углей.

Использование подобных саж в качестве наполнителя электропроводящих лакокрасочных покрытий и электродных композиций автономных источников тока позволяет одновременно решить задачу утилизации крупнотоннажных отходов лигноцеллюлозного происхождения и снизить зависимость отечественных производителей от импортных марок технического углерода. В работе [2] введение сажи в лакокрасочные композиции на основе эпоксидного олигомера в массовом соотношении с пленкообразующим 1:0,8–1:1 обеспечивает снижение удельного объемного электрического сопротивления покрытия до 2,5–10,6 Ом·см, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к электропроводящим покрытиям авиационного назначения.

Существенным преимуществом углеродных наполнителей по сравнению с металлическими порошками является отсутствие необходимости обеспечения прямого металлического контакта между частицами. Сажа и графит обладают развитой пористостью и способны адсорбировать пленкообразующее и растворитель, за счет чего в высохшем покрытии формируется плотный контакт поверхностей смежных углеродных частиц с образованием трехмерной пространственной проводящей сетки [2].

Крупнейшей по объему потребления областью применения технического углерода остается усиление эластомеров, резин на основе натурального и синтетических каучуков, используемых в шинной промышленности. Введение сажи в каучуковую матрицу многократно повышает прочностные и износостойкие характеристики вулканизата за счет образования устойчивых физико-химических связей на границе раздела фаз и формирования пространственной сетки агрегатов наполнителя. В связи с энергоемкостью и экологическими издержками производства нефтяного технического углерода в последние годы активно развивается направление частичной или полной замены традиционной сажи на углеродные материалы, получаемые пиролизом возобновляемой биомассы, в том числе для создания «зеленых шин» с пониженной зависимостью от невозобновляемого сырья [26, 27]. Помимо резинотехнической промышленности, углеродные материалы из биомассы рассматриваются также в качестве перспективных наполнителей термопластичных и реактопластичных полимерных композиций, где технический углерод используется не только для армирования, но и в качестве черного пигмента, ультрафиолетового стабилизатора и антистатической добавки. Применение биоугля вместо нефтяного технического углерода в подобных композициях позволяет снизить углеродный след изделий и найти практическое применение для крупнотоннажных отходов лесопереработки и агропромышленного комплекса [26].

Заключения

Проведенный анализ научно-технической литературы показывает, что выбор возобновляемого сырья и метода его термохимической обработки определяет область применения конечного продукта. Угли из рисовой шелухи, для которых характерна возможность достижения удельной поверхности от нескольких сотен до 3025 м²/г, наиболее востребованы в качестве сорбентов и электродных материалов двойнослойных суперконденсаторов. При этом карбонатная и гидрокарбонатная активация в ряде случаев обеспечивает сопоставимые или более высокие текстурные характеристики при меньшей коррозионной нагрузке на оборудование по сравнению с КОН [15]. Активированные угли из лигносульфоната натрия и его солей, для которых показана возможность получения удельной поверхности 1500–2800 м²/г и удельной емкости 200–390 Ф/г, представляют интерес как экологически чистая альтернатива углям, получаемым из ископаемого сырья. Высокопроводящие сажи из лигнино-углеводного сырья, напротив, характеризуются низкой (30–90 м²/г) удельной поверхностью и высокой

степенью графитизации [23, 24], что делает их аналогами коммерческих марок технического углерода. Помимо применения в качестве проводящих добавок в электродные пасты и в электропроводящие лакокрасочные покрытия и композиции [2], такие материалы по структурным характеристикам близки к биоугольным наполнителям.

Оптимизация времени активации и температурных режимов для каждого типа биомассы позволяет целенаправленно регулировать текстурные и проводящие свойства получаемых материалов. Внедрение описанных подходов не только решает важнейшую экологическую проблему утилизации крупнотоннажных сельскохозяйственных и промышленных отходов, но и формирует независимую сырьевую базу для высокотехнологичных производств, включая аэрокосмический комплекс, лакокрасочную и резинотехническую промышленность, производство наполненных пластиков и возобновляемую энергетику [1, 2, 5, 8, 9, 26].

Благодарности

Авторы благодарны ООО «БИО-СЕЛЛ ТЕК» и лично его руководителю Е.А. Узденю за предоставленные материалы целлюлозно-бумажного производства.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова, регистрационный номер № АААА-А21-121011990019-4.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Зверевич Ю.К., Кречетов Д.Д., Железняк В.Г. Исследование влияния модификаторов на электропроводность модельной композиции на основе эпоксидного олигомера // *Труды ВИАМ*. 2024. № 6 (136). С. 61–68. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-61-68.
3. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2022. № 6 (112). С. 58–67. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
4. Хрульков А.В., Донецкий К.И., Мельников Д.А., Клименко О.Н., Славин А.В. Липкость препрегов как функция различных параметров при выкладке заготовок деталей и образцов из полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. 2025. № 3 (145). С. 33–46. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.
5. Назаренко В.В. Анизотропные силикатные наполнители: специальные свойства в ЛКМ и покрытиях // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2012. № 1–2. С. 25–33.
6. Кузнецова В.А., Марченко С.А., Тимошина Е.А., Железняк В.Г. Исследование стойкости лакокрасочных покрытий в условиях воздействия гидроабразивной эрозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2026. № 1 (82). С. 209–218. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 29.07.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-209-218.
7. Земнухова Л.А., Панасенко А.Е., Цой Е.А. и др. Состав и строение образцов аморфного кремнезема, полученных из шелухи и соломы риса // *Неорганические материалы*. 2014. Т. 50. № 1. С. 82–89. DOI: 10.7868/S0002337X14010205.
8. Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Полимерные материалы для антифрикционных покрытий (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 5 (99). С. 56–63. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63.
9. Вольфович Ю.М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // *Электрохимия*. 2021. Т. 57. № 4. С. 197–238.

10. Arkhipova E.A., Novotortsev R.Yu., Ivanov A.S. et al. Rice husk-derived activated carbon electrode in redox-active electrolyte – new approach for enhancing supercapacitor performance // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 55. P. 105699. DOI: 10.1016/j.est.2022.105699.
11. Новоторцев Р.Ю., Суслова Е.В., Чен Кванки и др. Суперконденсаторы на основе активированных углей – продуктов переработки шелухи риса // *Журнал физической химии*. 2021. Т. 95. № 4. С. 1–9. DOI: 10.31857/S0044453721040191.
12. Li L., Wang J., Chen Z. et al. Preparation of sodium lignosulfonate-based porous carbon for supercapacitors with outstanding rate capacity and high voltage // *Chemical Engineering Journal*. 2025. Vol. 507. P. 160760. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160760.
13. Yerdautov M.S., Nazarov K., Mukhametuly B. et al. Characterization of Activated Carbon from Rice Husk for Enhanced Energy Storage Devices // *Molecules*. 2023. Vol. 28. No. 15. P. 5818. DOI: 10.3390/molecules28155818.
14. Скаков М.К., Амиров А., Шаймардан Е. и др. Получение высокопористого активированного угля с высокой удельной поверхностью из сельскохозяйственных отходов // *Вестник НЯЦ РК*. 2025. № 4. С. 190–197. DOI: 10.52676/1729-7885-2025-4-190-197.
15. Chen J., Liu J., Wu D. et al. Improving the supercapacitor performance of activated carbon materials derived from pretreated rice husk // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 44. P. 103432. DOI: 10.1016/j.est.2021.103432.
16. Sun R., Chen Y., Gao X. et al. Sodium lignosulfonate-derived hierarchical porous carbon electrode materials for supercapacitor applications // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 91. P. 112025. DOI: 10.1016/j.est.2024.112025.
17. Yi Y., Hou Y., Li Y. Preparation of high conductivity hierarchical porous carbon based on sodium lignosulfonate with pre-crosslinking // *BioResources*. 2020. Vol. 15. No. 4. P. 8995–9012.
18. Jiang Z., Xue X., Zhang Y. et al. N–O–S Co-Doped Hierarchical Porous Carbons Prepared by Mild KOH Activation of Ammonium Lignosulfonate for High-Performance Supercapacitors // *Nanomaterials*. 2025. Vol. 15. P. 1633. DOI: 10.3390/nano15211633.
19. Wang H.X., Huang J.W., Ren W.C. et al. Preparation of sodium lignosulfonate-based porous carbon and its application to supercapacitors // *Ionics*. 2024. Vol. 30. P. 8359–8368. DOI: 10.1007/s11581-024-05858-x.
20. Xi Y., Yang D., Qiu X. et al. Renewable lignin-based carbon with a remarkable electrochemical performance from potassium compound activation // *Industrial Crops and Products*. 2018. Vol. 124. P. 747–754. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.08.018.
21. Xi Y., Wang Y., Yang D. et al. K₂CO₃ activation enhancing the graphitization of porous lignin carbon derived from enzymatic hydrolysis lignin for high performance lithium-ion storage // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 785. P. 706–714. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.039.
22. Li X., Luo X., Dou L., Chen K. Preparation and Characterization of K₂CO₃-Activated Kraft Lignin Carbon // *BioResources*. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 2096–2108. DOI: 10.15376/biores.11.1.2096-2108.
23. Lu X., Lian G.J., Parker J. et al. Effect of carbon blacks on electrical conduction and conductive binder domain of next-generation lithium-ion batteries // *Journal of Power Sources*. 2024. Vol. 592. P. 233916. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.233916.
24. Zhou L., You X., Wang L. et al. Fabrication of Graphitized Carbon Fibers from Fusible Lignin and Their Application in Supercapacitors // *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 8. P. 1947. DOI: 10.3390/polym15081947.
25. Pan C., Ji Y., Ren S. et al. Lignin-Derived Activated Carbon as Electrode Material for High-Performance Supercapacitor // *Molecules*. 2025. Vol. 30. No. 1. P. 89. DOI: 10.3390/molecules30010089.
26. Drupitha M.P., Misra M., Mohanty A.K. Recent advances on value-added biocarbon preparation by the pyrolysis of renewable and waste biomass, their structure and properties: a move toward an ecofriendly alternative to carbon black // *Environmental Science: Advances*. 2023. Vol. 2. P. 1282–1301. DOI: 10.1039/D3VA00107E.
27. Karunanayake L., Etampawala T., de Silva D.J. et al. Role and potential of biochar as a sustainable alternative reinforcing filler to carbon black in rubber composites // *Biochar*. 2025. Vol. 7. P. 60. DOI: 10.1007/s42773-025-00429-3.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Zverevich Yu.K., Krechetov D.D., Zheleznyak V.G. Investigation of the effect of modifiers on the electrical conductivity of the model composition based on an epoxy oligomer. *Trudy VIAM*, 2024, no. 6 (136), pp. 61–68. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-6-61-68.
3. Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (review). Part 1. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), pp. 58–67. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.
4. Khrulkov A.V., Donetskiy K.I., Melnikov D.A., Klimenko O.N., Slavin A.V. Prepreg tack as a function of various parameters during laying out blanks of parts and samples from polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), pp. 33–46. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.
5. Nazarenko V.V. Anisotropic silicate fillers: special properties in paints and varnishes and coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*, 2012, no. 1–2, pp. 25–33.
6. Kuznetsova V.A., Marchenko S.A., Timoshina E.A., Zheleznyak V.G. The firmness of paint coatings to hydroabrasive erosion. *Aviation materials and technologies*, 2026, no. 1 (82), pp. 209–218. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 29, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2026-0-1-209-218.
7. Zemnukhova L.A., Panasenko A.E., Tsoi E.A. et al. Composition and structure of amorphous silica samples obtained from rice husk and straw. *Neorganicheskiye materialy*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 82–89. DOI: 10.7868/S0002337X14010205.
8. Serkova E.A., Khmelniyskiy V.V., Zastrogina O.B. Polymer materials for antifriction coatings (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 5 (99), pp. 56–63. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 29, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-5-56-63.
9. Volfkovich Yu.M. Electrochemical supercapacitors (review). *Elektrokhimiya*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 197–238.
10. Arkhipova E.A., Novotortsev R.Yu., Ivanov A.S. et al. Rice husk-derived activated carbon electrode in redox-active electrolyte – new approach for enhancing supercapacitor performance. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 55, p. 105699. DOI: 10.1016/j.est.2022.105699.
11. Novotorcev R.Yu., Suslova E.V., Chen Kwanki et al. Supercapacitors based on activated carbons – rice husk processing products. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2021, vol. 95, no. 4, pp. 1–9. DOI: 10.31857/S0044453721040191.
12. Li L., Wang J., Chen Z. et al. Preparation of sodium lignosulfonate-based porous carbon for supercapacitors with outstanding rate capacity and high voltage. *Chemical Engineering Journal*, 2025, vol. 507, p. 160760. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160760.
13. Yerdauletov M.S., Nazarov K., Mukhametuly B. et al. Characterization of Activated Carbon from Rice Husk for Enhanced Energy Storage Devices. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 15, p. 5818. DOI: 10.3390/molecules28155818.
14. Skakov M.K., Amirov A., Shaimardan E. et al. Production of highly porous activated carbon with a high specific surface area from agricultural waste. *Vestnik NYATS RK*, 2025, no. 4, pp. 190–197. DOI: 10.52676/1729-7885-2025-4-190-197.
15. Chen J., Liu J., Wu D. et al. Improving the supercapacitor performance of activated carbon materials derived from pretreated rice husk. *Journal of Energy Storage*, 2021, vol. 44, p. 103432. DOI: 10.1016/j.est.2021.103432.
16. Sun R., Chen Y., Gao X. et al. Sodium lignosulfonate-derived hierarchical porous carbon electrode materials for supercapacitor applications. *Journal of Energy Storage*, 2024, vol. 91, p. 112025. DOI: 10.1016/j.est.2024.112025.
17. Yi Y., Hou Y., Li Y. Preparation of high conductivity hierarchical porous carbon based on sodium lignosulfonate with pre-crosslinking. *BioResources*, 2020, vol. 15, no. 4, pp. 8995–9012.
18. Jiang Z., Xue X., Zhang Y. et al. N–O–S Co-Doped Hierarchical Porous Carbons Prepared by Mild KOH Activation of Ammonium Lignosulfonate for High-Performance Supercapacitors. *Nanomaterials*, 2025, vol. 15, p. 1633. DOI: 10.3390/nano15211633.

19. Wang H.X., Huang J.W., Ren W.C. et al. Preparation of sodium lignosulfonate-based porous carbon and its application to supercapacitors. *Ionics*, 2024, vol. 30, pp. 8359–8368. DOI: 10.1007/s11581-024-05858-x.
20. Xi Y., Yang D., Qiu X. et al. Renewable lignin-based carbon with a remarkable electrochemical performance from potassium compound activation. *Industrial Crops and Products*, 2018, vol. 124, pp. 747–754. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.08.018.
21. Xi Y., Wang Y., Yang D. et al. K₂CO₃ activation enhancing the graphitization of porous lignin carbon derived from enzymatic hydrolysis lignin for high performance lithium-ion storage. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 785, pp. 706–714. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.01.039.
22. Li X., Luo X., Dou L., Chen K. Preparation and Characterization of K₂CO₃-Activated Kraft Lignin Carbon. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 1, pp. 2096–2108. DOI: 10.15376/biores.11.1.2096-2108.
23. Lu X., Lian G.J., Parker J. et al. Effect of carbon blacks on electrical conduction and conductive binder domain of next-generation lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2024, vol. 592, p. 233916. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.233916.
24. Zhou L., You X., Wang L. et al. Fabrication of Graphitized Carbon Fibers from Fusible Lignin and Their Application in Supercapacitors. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 8, p. 1947. DOI: 10.3390/polym15081947.
25. Pan C., Ji Y., Ren S. et al. Lignin-Derived Activated Carbon as Electrode Material for High-Performance Supercapacitor. *Molecules*, 2025, vol. 30, no. 1, p. 89. DOI: 10.3390/molecules30010089.
26. Drupitha M.P., Misra M., Mohanty A.K. Recent advances on value-added biocarbon preparation by the pyrolysis of renewable and waste biomass, their structure and properties: a move toward an ecofriendly alternative to carbon black. *Environmental Science: Advances*, 2023, vol. 2, pp. 1282–1301. DOI: 10.1039/D3VA00107E.
27. Karunanayake L., Etampawala T., de Silva D.J. et al. Role and potential of biochar as a sustainable alternative reinforcing filler to carbon black in rubber composites. *Biochar*, 2025, vol. 7, p. 60. DOI: 10.1007/s42773-025-00429-3.

Информация об авторах

Сивенкова Елизавета Владимировна, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; аспирант, МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

Новоторцев Роман Юрьевич, научный сотрудник, МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

Славин Андрей Вячеславович, начальник Научно-исследовательского отделения, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кречетов Данила Дмитриевич, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Савилов Сергей Вячеславович, помощник генерального директора по науке, д.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; ведущий научный сотрудник, д.х.н., доцент, МГУ им. М.В. Ломоносова, dekanat@chem.msu.ru

Information about the authors

Elizaveta V. Sivenkova, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Graduate Student, Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

Roman Yu. Novotortsev, Researcher, Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

Andrey V. Slavin, Head of Scientific-Research Bureau, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Danila D. Krechetov, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Savilov, Assistant to Director General of Science, Doctor of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Leading Researcher, Doctor of Sciences (Chem.), Associate Professor, Lomonosov Moscow State University, dekanat@chem.msu.ru

Статья поступила в редакцию 18.08.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.08.2026.

The article was submitted 18.08.2026; approved and accepted for publication after reviewing 19.08.2026.