

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОПЛИВА
И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ
CHEMICAL TECHNOLOGY OF FUEL
AND HIGH-ENERGY SUBSTANCES**

Научная статья

УДК 662.74:541.13:544.6

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-69-78

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ НА ОСНОВЕ
ТВЕРДЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ КУЗБАССА**

**Андреева Татьяна Александровна, Андреев Виктор Александрович,
Папин Андрей Владимирович**

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: pav.httt@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

15 января 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 июня 2026 г.

Принята к публикации:

01 июля 2026 г.

Ключевые слова:

электрохимическая ячейка,
твердые углеводороды,
угольные электроды, Кузбасс,
источники тока,
альтернативная энергетика.

Аннотация.

В статье представлены результаты научно-исследовательской работы, направленной на разработку новых ресурсоэффективных электрохимических систем с применением углеродных материалов регионального происхождения. Основная цель исследования заключалась в изучении возможности создания работоспособной электрохимической ячейки на основе твердых углеводородов Кузбасса, что представляет значительный научный и практический интерес для региона. В качестве активного материала электродов исследовались различные марки каменных углей, отобранные на месторождения Кемеровской области. Критериями отбора служили высокая степень углефикации и оптимально низкое содержание золы, что является важным для обеспечения хороших электрохимических характеристик. Экспериментальная часть работы включала этап подготовки угольных электродов методом прессования с использованием связующего компонента, а также комплексное исследование их ключевых свойств: электропроводности и электрохимической активности. В рамках исследования была разработана и собрана конструкция лабораторной электрохимической ячейки с использованием созданных угольных электродов. Проведенные испытания продемонстрировали ее работоспособность: ячейка способна генерировать плотность тока до 2 мА/см² при напряжении холостого хода около 0,5 В. Тестирование в различных электролитных средах подтвердило принципиальную возможность применения данного устройства в качестве простого химического источника тока. Полученные результаты свидетельствуют о возможности создания электрохимических устройств на основе доступного углеводородного сырья Кемеровской области. В качестве направлений для дальнейших исследований авторами обозначены оптимизация состава и структуры электродов (включая подбор связующего), поиск более эффективного состава электролита, а также работы по повышению удельной энергетической плотности ячейки для потенциального практического применения.

Для цитирования: Андреева Т.А., Андреев В.А., Папин А.В. Разработка электрохимической ячейки на основе твердых углеводородов Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 3 (175). С. 69-78. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-69-78, EDN: OUUZJM

Введение

Угольная промышленность, традиционно являющаяся основой экономики Кемеровской области, на данный момент находится в кризисной ситуации. Снижение стоимости твердого топлива, переход на более инновационные технологии производства различных видов энергии подталкивают к необходимости пересмотра старой модели функционирования промышленности региона, когда в основе лежала только примитивная схема: добыча и экспорт каменного угля. Очевидным стало то, что дальнейшее наращивание объемов добычи угля не рационально и экологически неоправданно, Кузбасс давно занимает первые места в списках экологически неблагополучных районов Российской Федерации [1, 2]. Выход из ситуации все более видится в обдуманном отношении к главному сырью Кузбасса – каменному углю, к его составу и качеству, ведь он является не только топливом, но прежде всего химическим сырьем, интересным и перспективным для его глубокой переработки и создания передовых научных новинок. По разным схемам глубокой переработки угля может получаться целая линейка продуктов с высокой добавленной стоимостью, масштабное производство которых на территории Кемеровской области решит проблему нехватки высококвалифицированных рабочих мест и, возможно, станет мощным импульсом для решения социально-экономических проблем региона и перспективным заделом на будущее.

Каменный уголь – твердый углеводород, имеющий полициклическую ароматическую структуру с добавлением различных органических фрагментов: это функциональные группы с гетероатомами, гидроксильная, карбоксильная группы и проч. [3, 10, 18]. Также в составе каменного угля находятся примеси неорганических компонентов, например, оксидов натрия, кальция, алюминия, а также редких и рассеянных металлов (германий, иридий, золото и др.). Оксид алюминия и оксид кремния интересен в медицинской отрасли для производства гемостатиков – кровоостанавливающих средств первой, в том числе и тактической, помощи, а также сорбентов желудочно-кишечного тракта. Элементы германий и др. обладают набором уникальных свойств, присущих как металлам, так и неметаллам, и незаменимы для высокотехнологичного производства электроники.

В настоящее время приобретает новую актуальность использование угля в сфере энергетики, но уже не как обычного топлива, а как особенной химической структуры,

способной встраиваться в систему химического источника тока (топливного элемента). Известны различные конструкции таких источников: источники на водороде, твердоотопливные элементы с расплавленными карбонатами, химические источники тока (ХИТ) с полимерной мембраной вместо электролита. Все эти конструкции обладают существенным недостатком – дорогими и дефицитными компонентами, что замедляет внедрение таких элементов в широкомасштабное производство [4, 13, 16, 19].

В химических источниках тока необходимо организовать освобождение электронов посредством химического превращения на аноде и перенос этих электронов по внешней цепи к катоду. Химическая реакция, позволяющая такой обмен электронами, называется токообразующей реакцией.

Однако первичный электрохимический элемент находится в рабочем состоянии до тех пор, пока не израсходуются вещества-участники токообразующей реакции, т. е. данный элемент не предусматривает многократное использование.

Если в процессе работы элемента ни один из электродов не разрушается, а вещества-участники токообразующей реакции можно подавать в элемент непрерывно, и непрерывно же отводить ненужные для элемента продукты реакции, то такая конструкция представляет собой топливный элемент (ТЭ). В топливном элементе электроды не только служат проводниками первого рода, но и могут быть также катализаторами электрохимических реакций [9].

Углеродные материалы широко используют при изготовлении различных химических источников тока, так как они способны селективно ускорять окислительно-восстановительные реакции в электрохимических системах, обладают отличной электро- и теплопроводностью, характеризуются стабильностью протекания электрохимических реакций, доступны, распространены и относительно дешевы.

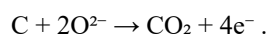
Топливом для ТЭ DCFC могут служить не только уголь, графит, кокс, но и углеродсодержащие отходы, древесный уголь, торф, а также растительные остатки.

Наибольший интерес представляет утилизация твердых углеродсодержащих отходов с получением постоянного электрического тока по технологии, не предусматривающей выделения вредных побочных продуктов.

Основным претендентом на роль твердого топлива для электрохимических систем, безусловно, является уголь во всем его

многообразии – от бурого лигнита до высококалорийного антрацита.

Один из наиболее перспективных форматов – это использование угольных суспензий или паст. Уголь, измельченный до микронных размеров, диспергируется в жидком электролите (чаще всего щелочном, например, гидроксиде калия КОН) с добавками для стабилизации. Такая угольная «жидкость» может прокачиваться через анодную камеру специального прямого угольного топливного элемента, который по-английски называют Direct Carbon Fuel Cell, или сокращенно DCFC. В нем происходит, по сути, электрохимическое «холодное горение». В случае кислород-ионного электролита на аноде частица углерода окисляется следующим образом:



Ключевое отличие от горения: процесс идет при значительно более низких температурах, а электроны отбираются напрямую, что теоретически позволяет достичь КПД до 80%.

При использовании в качестве ионного проводника водных растворов электролитов углерод может восстанавливаться до метана, метанола и других органических веществ.

Анодное окисление углерода происходит по схеме присоединения кислорода к углероду и отщепления оксида (или монооксида) углерода от общей массы анода. При этом процесс протекает быстрее в среде концентрированных щелочей, чем в среде концентрированных кислот.

В реакции окисления охотнее вступают атомы углерода, не входящие в состав ароматического ядра, а образующие парафиновые цепочки. Кроме того, ионы кислорода могут не только взаимодействовать с

поверхностным слоем углерода, но и проникать между пачками углеродных сеток.

Окисленный уголь более стоек к электрохимическому окислению за счет наличия на поверхности органических кислородсодержащих групп.

Методы

В качестве объектов исследования в работе рассматриваются следующие аспекты:

1) **Угольные электроды (аноды/катоды)**, созданные на основе углей Кузбасса. Композитные материалы системы «активный угольный материал + электропроводящая добавка (например, сажа) + полимерное связующее», сформированные в виде брикетов, паст или покрытий на токоотводе.

2) Лабораторный прототип электрохимической ячейки на основе созданных угольных электродов. В конечном итоге это должна быть электрохимическая ячейка, состоящая из угольного анода, катода (возможно, также угольного или другого типа), разделителя и жидкого или твердого электролита.

Инструменты и подходы, с помощью которых испытывается электрохимическая ячейка:

1) Методы получения электродов: брикетирование (прессование) порошковых композиций под давлением, нанесение покрытий методом лабораторного литья пасты, пропитка.

2) Гальваностатическая зарядка-разрядка: непосредственное измерение емкости, энергетической и мощностной плотности прототипа ячейки, оценка стабильности при циклировании.

3) Импедансная спектроскопия: анализ внутреннего сопротивления ячейки, сопротивления переносу заряда на границе



Рис. 1. Анод, полученный брикетированием технического углерода

Fig. 1. Anode produced by briquetting of technical carbon

электрод-электролит, диффузионных процессов.

4) Измерение напряжения холостого хода (НРЦ) и снятие разрядных кривых для оценки практических выходных параметров ячейки.

Для измерения важнейших электрических параметров электрохимической ячейки используется циклическая вольтамперометрия (ЦВА) – метод, который заключается в измерении тока, протекающего через рабочий электрод (углеродный анод), при циклическом изменении его потенциала. Цикличность процесса заключается в плавном увеличении напряжения, а затем в таком же плавном уменьшении его в обратную сторону при наблюдении за реакцией системы.

Для изготовления брикетированного анода используется штемпельный (механический) пресс, который обеспечивает очень высокое давление и используется для производства

брикетов строго заданной формы и высокой прочности. В данном устройстве важную роль играют пресс-форма и штемпель, совершающий возвратно-поступательное движение.

Углеродный порошок засыпается в полость формы, штемпель с усилием вдавливается в нее, сжимая материал. После этого штемпель поднимается, и готовый брикет выталкивается из матрицы.

На базе Лаборатории термодинамики многофазных систем КузГТУ проводятся работы по созданию и исследованию электрохимической ячейки с угольным анодом. Анод в данной схеме может представлять собой спрессованный цилиндр (можно использовать и пылевидное состояние) из угля (а также других твердых углеводородов: шламов, углеродных остатков пиролиза автошин и т. д.) и связующего (жидкого стекла). В итоге система представляет



Рис. 2. Анод в виде сборника пылевидного угольного материала
Fig. 2. Anode designed as a pulverized coal collector

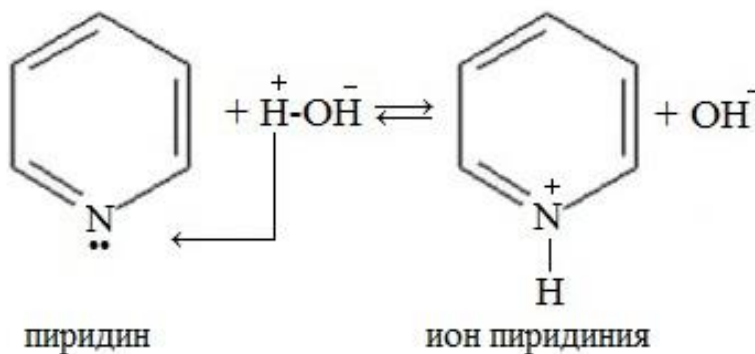


Рис. 3. Механизм образования щелочной среды пиридином в водном растворе
Fig. 3. Mechanism of the basic environment formation by pyridine in an aqueous solution

специальный сборник для помещения тонкодисперсного угля и предотвращения соприкосновения его с катодом (см. Рис. 1, 2).

Большое внимание при этом исследовании уделяется составу электролита. Идеальным электролитом можно было бы назвать раствор или расплав щелочи (гидроксида натрия или калия), если бы не его способность к агрессивному разведению металлов и других материалов. Присутствие модифицирующих добавок позволяет повысить эффективность электролита [5, 7]. Интересен как добавка, например, раствор пиридина – вещества с ароматической структурой, близкой к структуре угля, что может улучшить передачу электронов от анода к катоду, имеющего щелочную реакцию среды (см. Рис. 3), а значит, не способного нейтрализовывать основной компонент электролита [8, 11, 12].

Следующий момент, необходимый к рассмотрению в ходе исследования – это подбор приемлемой пары к аноду, т. е. материала катода. Нами предложено в качестве катода использовать медь, так как у нее потенциал больше, чем у углерода. Также медь является отличным проводником электричества [6, 11, 15].

Сравнительная характеристика для двух разных материалов дана в Таблице 1.

Анод и катод в ходе работы были помещены

в емкость с электролитом, которая подогревалась на электрической плитке. В ходе предварительных экспериментов было установлено, что при температурах ниже 80°C скорость процесса недостаточна для регистрации стабильных электрохимических параметров. Для обеспечения стабильности процесса и воспроизводимости результатов электролит термостатировали при температуре 90°C, что несколько ниже температуры кипения системы (92,6°C), позволяя избежать парообразования и изменения концентрации раствора в ходе измерений.

Также для усиления окислительных процессов к катоду был организован барботаж воздуха при помощи лабораторного мини-компрессора. Значение электродвижущей силы для такого источника с анодом из углерода и медным катодом составило 0,5 В. Далее электрохимическая ячейка подверглась испытаниям с использованием магазина сопротивлений, при этом ячейка активно разряжалась, и наблюдалось падение напряжения. Результаты испытаний приведены в Таблице 2.

Результаты исследования

Во время исследования была определена пригодность различных видов углерода, в том числе технического углерода пиролиза автошин, для изготовления топливного элемента с прямым

Таблица 1. Стандартные электродные потенциалы для меди и углерода

Table 1. Standard electrode potentials for copper and carbon

Cu^{2+}/Cu $E^0 = +0.337 \text{ В}$ Реакция: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{тв})$	CO_2/C (графит) $E^0 = +0.207 \text{ В}$ Реакция: $\text{CO}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow \text{C}(\text{тв}) + 2\text{H}_2\text{O}$
--	---

Таблица 2. Практические данные, полученные в ходе испытания

Table 2. Practical data obtained during the testing

R, Ом	I, mA	U, В	j, mA/cm ²	R, Ом	I, mA	U, В	j, mA/cm ²
0,5	58	0,03	4,62	10	20	0,22	1,59
1,0	40	0,05	3,18	11	19	0,23	1,51
1,5	44	0,07	3,50	12	18	0,23	1,43
2,0	43	0,09	3,42	13	17	0,24	1,35
2,5	39	0,11	3,11	14	16	0,24	1,27
3,0	37	0,12	2,95	15	16	0,25	1,27
3,5	34	0,14	2,71	16	15	0,25	1,19
4,0	32	0,14	2,55	17	14	0,26	1,11
4,5	30	0,15	2,39	18	13,6	0,26	1,08
5,0	28	0,16	2,23	19	13	0,27	1,04
5,5	27	0,17	2,15	20	12,8	0,27	1,02
6,0	26	0,18	2,07	30	9,3	0,27	0,74
6,5	25	0,19	1,99	40	7,2	0,28	0,57
7,0	24	0,19	1,91	50	5,8	0,28	0,46
7,5	23	0,20	1,83	60	5	0,29	0,40
8,0	23	0,20	1,83	70	4,3	0,30	0,34
8,5	22	0,21	1,75	80	3,8	0,31	0,30
9,0	21	0,21	1,67	90	3,4	0,32	0,27
9,5	20	0,22	1,59	100	3	0,38	0,24

электрохимическим окислением твердого топлива. Твердый углеродистый остаток пиролиза практически не нашел применения в народном хозяйстве, так как он является низкокачественным сырьем: имеет повышенную зольность (12-15 мас. %) и сернистость, в результате чего при сжигании данного остатка могут в большом количестве образовываться ядовитые соединения серы.

Топливный элемент был подвержен испытаниям, в результате которых были определены его важнейшие электрические характеристики: вольт-амперная характеристика, внутреннее сопротивление источника тока, полезная мощность элемента. Также был определен коэффициент полезного действия установки и был установлен номинальный режим ее работы.

Полное внутреннее сопротивление топливного элемента может быть найдено по параметрам двух режимов нагрузки по формуле:

$$r = \frac{U_p^I - U_p^{II}}{I_p^{II} - I_p^I}, \quad (1)$$

где U_p^I, U_p^{II} – напряжение, соответствующее двум различным режимам нагрузки, В;

I_p^I, I_p^{II} – сила тока, соответствующая двум различным режимам нагрузки, А.

$$r = \frac{0,22 - 0,05}{40 - 20} = 8,5 \text{ Ом}.$$

Для сравнения максимальное внутреннее сопротивление свинцового аккумулятора составляет 0,1 Ом, элемента Гроува – 0,1-0,2 Ом, стандартного элемента Вестона – 20-100 Ом.

Значение полного внутреннего сопротивления топливного элемента, определенное по параметрам двух режимов нагрузки, составило 8,5 Ом.

Максимальная полезная мощность лабораторного образца топливного элемента DCFC находится в пределах 0,0042 Вт. Данное значение соответствует активному сопротивлению нагрузки $R = 8,0$ Ом (при силе тока $I = 23$ мА), т. е. данные электрические параметры характеризуют номинальный режим работы установки. Коэффициент полезного действия лабораторной установки при данном режиме составил 48,5%.

Коэффициент полезного действия лабораторной установки определяется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_{нагр}}{P_{полн}} = \frac{U}{E} = \frac{R}{R+r}, \quad (2)$$

где $P_{нагр}$ – полезная мощность источника тока, Вт;

$P_{полн}$ – полная электрическая мощность источника тока, Вт;

U – напряжение, В;

E – электродвижущая сила, В;

R – активное сопротивление нагрузки, Ом;

r – полное внутреннее сопротивление источника тока, Ом.

Максимальная полезная мощность лабораторного образца топливного элемента DCFC составила 0,0042 Вт. Данное значение соответствует активному сопротивлению нагрузки $R = 8,0$ Ом (при силе тока $I = 23$ мА), т. е. данные электрические параметры характеризуют номинальный режим работы установки. Отсюда находится коэффициент полезного действия лабораторной установки при номинальном режиме:

$$\eta = \frac{8}{8 + 8,5} = 0,4848 \text{ или } 48,5 \, \%.$$

Обсуждение

В ходе исследования были высказаны предположения по поводу влияния зольности и серы топлива, подвергающегося электрохимическому окислению, на работу установки.

Согласно литературным данным, оптимальная величина зольности топлива не должна превышать 20%. При превышении возможны следующие побочные явления:

- блокируются активные центры анода;
- возрастает электронное сопротивление;
- возможно образование изолирующих слоев [18].

Соединения серы, находящиеся в топливе, не могут ухудшить работу установки (проявить себя как каталитический яд), т. к. в данном топливном элементе не используется анодный катализатор для ускорения отдачи электронов.

Повышение температуры электролита до 90°C позволяет увеличить скорость диффузии ионов и снизить омические потери в ячейке, что интенсифицирует электрохимические процессы. Выбор данного температурного режима обусловлен стремлением к максимальной кинетической энергии системы при сохранении ее фазовой стабильности (предотвращение вскипания, которое начинается при 92,6°C).

Напряжение разомкнутой цепи химического источника тока является интенсивным свойством, т. е. таким, которое не зависит от масштабов установки, количества реагирующих веществ и прочего. В результате проведенной работы была сконструирована единичная электрохимическая ячейка со стабильным значением $U_{рц} = 0,45-0,60$ В. Стоит отметить, что большинство известных прототипов DCFC (например, на основе расплавленных карбонатов) имеют $U_{рц}$ в пределах 0,5-0,8 В, но при обязательном наличии никелевого анода или каталитически активного перовскита. Достижение нижней границы этого диапазона (0,45–0,60 В) без катализаторов позволяет говорить о снижении себестоимости ячейки при сохранении приемлемых энергетических характеристик. [20].

Выводы

В ходе экспериментального исследования была рассмотрена конструкция топливного элемента, способного к электрохимическому окислению технического углерода пиролиза автошин, с достаточно высокими электрическими характеристиками и простотой технической реализации, что допускает создание на основе такого ТЭ электрохимической энергоустановки.

На основе проведенных экспериментов, их результата можно предложить следующие векторы развития твердопливной химической ячейки:

1) Выявлена необходимость продолжения поиска наиболее эффективного материала для катода, который обеспечит максимальную разность между электродными потенциалами и позволит вырабатывать максимальное напряжение.

2) Проведены изыскания, связанные с подбором корпуса ячейки. Критериями выбора стали стойкость к агрессивным средам, устойчивость к высоким температурам (до 200°C), доступность и дешевизна (возможно применение углеродного полотна из специальных углеродных волокон).

3) Проведены работы по модификации электролита различными добавками: электролит должен иметь максимальную проводимость и стабильность при длительной работе при нагреве.

Таким образом, исследования в области химических источников тока является актуальными и приоритетными, так как каменный уголь – основной источник энергии для Кузбасса. Проведенные исследования подтверждают, что сконструированная единичная электрохимическая ячейка по схеме DCFC позволяет эффективно решать задачу более рационального использования углей, поставленную на фоне возрастающей роли месторождений Донбасса, Якутии и Дальнего Востока в энергобалансе России. Одним из возможных решений будет являться применение электрохимических ячеек на основе твердых углеводородов в самом регионе, Кузбассе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А. А. Структурные проблемы угледобычи в Кузбассе // Энергетический бюллетень. 2021. № 42. С. 23–45. Режим доступа: <https://energy.skolkovo.ru/ru/> (дата обращения: 12.10.2025).

2. Угольная промышленность Сибири в XXI веке. Под ред. В. А. Крюкова. Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН. Новосибирск : ИЭОПП СО РАН, 2019. 367 с. ISBN 978-5-89665-255-1. Режим доступа: http://www.ieie.su/upload/ugolnaya_promyshl

ennost.pdf (дата обращения: 15.10.2025).

3. Карнаухов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск : Наука, 2010. 470 с.

4. Бард А., Фолкнер Л. Электрохимические методы: основы и применения. Пер. с англ. под ред. А. Л. Львова. 2-е изд. Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2013. 598 с. ISBN 978-5-9963-0157-6. Режим доступа: <https://www.wiley.com/en-us/> (дата обращения: 15.10.2025).

5. CRC Handbook of Chemistry and Physics / ed. by J. R. Rumble. 104th ed. Boca Raton : CRC Press, 2023. 1 electron. opt. disc (CD-ROM). ISBN 978-1-032-27948-6. Section 5: Electrochemistry.

6. Электрохимические данные [Электронный ресурс]. ИЮПАК, проект 2001-019-1-500. Электрон. дан. Режим доступа: <https://iupac.org/project/2001-019-1-500> (дата обращения: 15.10.2025).

7. The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals / ed. by M.J. O'Neil. 15th ed. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2013. 2708 p. ISBN 978-1-84973-670-1. Режим доступа: <https://www.rsc.org/merck-index> (дата обращения: 15.10.2025).

8. CRC Handbook of Chemistry and Physics [Electronic resource]. Ed. by J. R. Rumble. 104th ed. Boca Raton : CRC Press, 2023. 1 online resource. ISBN 978-1-032-27948-6. Section 3: Fluid Properties. Режим доступа: <https://hbcponline.com> (дата обращения: 15.10.2025).

9. Гушин А. А., Павлова А. А. Электрохимические свойства углеродных материалов на основе природного графита и каменного угля // Электрохимическая энергетика. 2020. Т. 20. № 4. С. 195–205.

10. Иванов И. С., Козлов А. С. Использование ископаемых углей в качестве активных материалов для химических источников тока: обзор // Альтернативная энергетика и экология. 2019. № 5–7. С. 56–70.

11. Кириллов Н. Г., Смирнов В. В. Современные углеродные материалы для электрохимии. М. : Физматлит, 2018. 320 с.

12. Левин Б. В., Петров А. М. Разработка и исследование угольных электродов для электрохимических систем // Журнал прикладной химии. 2021. Т. 94, Вып. 3. С. 360–368.

13. Петров А. Д., Соколов Д. В. Физико-химические основы создания углерод-углеродных суперконденсаторов. Екатеринбург : УрО РАН, 2017. 200 с.

14. Тихонов С. Н., Федоров Р. Ю. Исследование возможности применения бурых и каменных углей в энергетических устройствах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5. С. 223–235.

15. Харитонов В. П., Мельников В. П. Углеродные наноматериалы в электрохимических источниках тока. Новосибирск: Наука, 2016. 278 с.

16. Chen S., Wang G. Coal-based carbon materials for electrochemical energy storage devices: A review // Journal of Materials Chemistry A. 2020. Vol. 8. Iss. 31. Pp. 15429–15444.

17. Hulicova-Jurcakova D., Puziy A. M. Highly stable performance of supercapacitors from phosphorus-enriched carbons // Journal of the American Chemical Society. 2019. Vol. 141. Iss. 24. Pp. 9617–9625.

18. Jiang H., Lee P. S. Design of advanced porous

carbon materials for high-performance electrochemical capacitors // Energy & Environmental Science. 2013. Vol. 6. Iss. 1. Pp. 41–53.

19. Raymundo-Piñero E., Kierzek K. Relationship between the nanoporous texture of activated carbons and their capacitance properties in different electrolytes // Carbon. 2016. Vol. 44. Iss. 12. Pp. 2498–2507.

20. Wang Y., Song Y. Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene // Science. 2012. Vol. 332. Iss. 6037. Pp. 1537–1541.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Андреева Татьяна Александровна – аспирант Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», e-mail: andreeva.tatjana@mail.ru

Андреев Виктор Александрович – аспирант Института энергетики ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», e-mail: andreevva@kuzstu.ru

Папин Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент Института химических и нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», e-mail: pav.httt@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Андреева Татьяна Александровна – концептуализация исследования, сбор и анализ данных, написание текста.

Андреев Виктор Александрович – обзор соответствующей литературы, сбор и анализ данных.

Папин Андрей Владимирович – обзор соответствующей литературы, научный менеджмент, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DEVELOPMENT OF AN ELECTROCHEMICAL CELL BASED ON SOLID HYDROCARBONS FROM KUZBASS

Tatyana A. Andreeva, Viktor A. Andreev, Andrey V. Papin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: pav.httt@kuzstu.ru



Article info

Received:

15 January 2026

Accepted for publication:

15 June 2026

Accepted:

Abstract.

The article presents the results of a research study aimed at developing new resource-efficient electrochemical systems using carbon materials of regional origin. The main objective of the research was to investigate the possibility of creating a functional electrochemical cell based on solid hydrocarbons from Kuzbass, which is of significant scientific and practical interest for the region. Various grades of bituminous coals sampled from deposits in the Kemerovo region were studied as the active electrode material. The selection criteria were a high degree of coalification and optimally low ash content, which is important for ensuring good electrochemical characteristics. The experimental part of the work included the stage of preparing coal electrodes by the pressing method using a binder component, as well as a

01 July 2026

Keywords: electrochemical cell, solid hydrocarbons, coal electrodes, Kuzbass, power sources, alternative energy

comprehensive study of their key properties: electrical conductivity and electrochemical activity. As part of the research, a design for a laboratory electrochemical cell using the created coal electrodes was developed and assembled. Conducted tests demonstrated its functionality: the cell is capable of generating a current density of up to 2 mA/cm² at an open-circuit voltage of about 0.5 V. Testing in various electrolyte media confirmed the fundamental possibility of using this device as a simple chemical current source. The obtained results indicate the feasibility of creating electrochemical devices based on the accessible hydrocarbon raw materials of the Kemerovo region. As directions for further research, the authors identify the optimization of the electrode composition and structure (including the selection of a binder), the search for a more effective electrolyte composition, as well as work on increasing the specific energy density of the cell for potential practical application

For citation: Andreeva T.A., Andreev V.A., Papin A.V. Development of an electrochemical cell based on solid hydrocarbons from Kuzbass. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 3(175):69-78. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-3-69-78, EDN: OUUZJM

REFERENCES

1. Makarov A.A. Structural problems of coal mining in Kuzbass. *Energy Bulletin*. 2021; 42:23-45. Retrieved from <https://energy.skolkovo.ru/ru/> (accessed: 12.10.2025).
2. Ugol'nayapromyshlennost' Sibiri v XXI veke [The coal industry of Siberia in the 21st century]. V.A. Kryukov (Ed.). Novosibirsk: IEOPP SO RAN; 2019. 367 p. ISBN 978-5-89665-255-1. Retrieved from http://www.ieie.su/upload/ugolnaya_promyshlennost.pdf (accessed: 15.10.2025).
3. Karnaukhov A.P. Adsorbtsiya. Tekstura dispersnykh i poristyykh materialov. Adsorption. [Texture of dispersed and porous materials]. Novosibirsk: Nauka; 2010. 470 p.
4. Bard A.J., Faulkner L.R. *Elektrokhimicheskiemetody: osnovyiprimeneniya* [Electrochemical methods: fundamentals and applications] (2nd ed.). A.L. L'vov (Trans. & Ed.). Moscow: Binom. Laboratoriyaznaniy; 2013. 598 p. ISBN 978-5-9963-0157-6. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-us/> (accessed: 15.10.2025).
5. Rumble J.R. (Ed.) *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (104th ed.). Boca Raton: CRC Press; 2023. ISBN 978-1-032-27948-6. Section 5: Electrochemistry.
6. Electrochemical Data [Electronic resource]. (n.d.). IUPAC, project 2001-019-1-500. Retrieved from <https://iupac.org/project/2001-019-1-500> (accessed: 15.10.2025).
7. O'Neil M.J. (Ed.). *The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs, and Biologicals* (15th ed.). Cambridge: Royal Society of Chemistry; 2013. 2708 p. ISBN 978-1-84973-670-1. Retrieved from <https://www.rsc.org/merck-index> (accessed: 15.10.2025).
8. Rumble J.R. (Ed.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (104th ed.). Boca Raton: CRC Press; 2023. ISBN 978-1-032-27948-6. Section 3: Fluid Properties. Retrieved from <https://hbcponline.com> (accessed: 15.10.2025).
9. Gushchin A.A., Pavlova A.A. Electrochemical properties of carbon materials based on natural graphite and bituminous coal. *Electrochemical Energetics*. 2020; 20(4):195-205.
10. Ivanov I.S., Kozlov A.S. The use of fossil coals as active materials for chemical current sources: A review. *Alternative Energy and Ecology*. 2019; 5-7:56-70.
11. Kirillov N.G., Smirnov V.V. *Modern carbon materials for electrochemistry*. Moscow: Fizmatlit; 2018. 320 p.
12. Levin B.V., Petrov A.M. Development and study of coal electrodes for electrochemical systems. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2021; 94(3):360-368.
13. Petrov A.D., Sokolov D.V. *Physicochemical fundamentals of carbon-carbon supercapacitor design*. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2017. 200 p.
14. Tikhonov S.N., Fedorov R.Yu. Investigation of the possibility of using lignite and bituminous coals in energy devices. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021; 5:223-235.
15. Kharitonov V.P., Melnikov V.P. *Carbon nanomaterials in electrochemical power sources*. Novosibirsk: Nauka; 2016. 278 p.
16. Chen S., Wang G. Coal-based carbon materials for electrochemical energy storage devices: A review. *Journal of Materials Chemistry A*. 2020; 8(31):15429-15444.
17. Hulicova-Jurcakova D., Puziy A.M. Highly stable performance of supercapacitors from phosphorus-enriched carbons. *Journal of the American Chemical Society*. 2019; 141(24):9617-9625.
18. Jiang H., Lee P.S. Design of advanced porous carbon materials for high-performance electrochemical capacitors. *Energy & Environmental Science*. 2013; 6(1):41-53.

19. Raymundo-Piñero E., Kierzek K. Relationship between the nanoporous texture of activated carbons and their capacitance properties in different electrolytes. *Carbon*. 2016; 44(12):2498-2507.

20. Wang Y., Song Y. Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene. *Science*. 2012; 332(6037):1537-1541.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Tatyana A. Andreeva - postgraduate student at the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: andreeva.tatjana@mail.ru

Viktor A. Andreev - postgraduate student at the Institute of Energy, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: andreevva@kuzstu.ru

Andrey V. Papin - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Institute of Chemical and Oil and Gas Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: pav.http@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Tatyana A. Andreeva - conceptualization of research, data collection and analysis, writing text.

Viktor A. Andreev - review of relevant literature, data collection and analysis.

Andrey V. Papin - review of relevant literature, scientific management, writing text.

All authors have read and approved the final manuscript.

