

УДК 66.091.3-997:546.05:621.03
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355
Шифр специальности ВАК: 2.4.9

Углеродные матрицы, допированные Sr, для использования в качестве электродов в радиоизотопных источниках электрической энергии

А.А. Аскарова¹, В.Н. Николкин¹, Д.С. Бутаков^{1✉}, Л.П. Синельников¹, В.Н. Рычков²

¹ АО «Институт реакторных материалов», Россия, г. Заречный

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия, г. Екатеринбург

✉ butakov_ds@irmatom.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью создания новых безопасных источников энергии, способных удовлетворить нужды производства и медицины там, где применение традиционных источников энергии невозможно или нерентабельно. К числу таких источников могут быть отнесены радиоизотопные источники питания, в которых выработка энергии обеспечивается за счет естественного распада радионуклидов. Важнейшими составляющими источников тока типа суперконденсаторов являются электродные материалы, характеристики которых определяют электрофизические показатели радиоизотопных источников. В данной работе предложен способ синтеза углеродной матрицы, допированной Sr, для использования в качестве электродов радиоизотопных источников питания. *Цель:* разработка, освоение и оптимизация метода синтеза электродов радиоизотопных источников питания на основе углеродных материалов, допированных радиоизотопом Sr-90. *Объекты:* углеродный материал, допированный имитатором радиоизотопа Sr-90 (Sr стабильный). Углеродные матрицы получены карбонизацией резорцин-формальдегидной смолы, допированной солью стабильного стронция. *Методы:* сканирующая электронная микроскопия, низкотемпературная адсорбция-десорбция азота, циклическая вольтамперометрия, гальваностатический заряд-разряд, импедансная микроскопия. *Результаты.* Проведен синтез углеродной матрицы, допированной стабильным изотопом стронция, методом полукарбонизации с последующей физической активацией углекислым газом. Исследованы структура, пористость и электрохимические характеристики материала. Установлено, что физическая активация положительно сказывается на развитии удельной площади поверхности и мезопористости образцов синтезированной матрицы, вследствие чего улучшаются ее электрохимические характеристики. Метод физической активации предложен в качестве наиболее предпочтительного для синтеза углеродной матрицы, допированной изотопами стронция, для применения в качестве электродов радиоизотопных источников питания.

Ключевые слова: радиоизотопный источник, углеродная матрица, резорцин-формальдегидная смола, изотоп стронция, физическая активация, площадь поверхности, мезопористость, электрическая емкость

Для цитирования: Углеродные матрицы, допированные Sr, для использования в качестве электродов в радиоизотопных источниках электрической энергии / А.А. Аскарова, В.Н. Николкин, Д.С. Бутаков, Л.П. Синельников, В.Н. Рычков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 135–142. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355

UDC 66.091.3-997:546.05:621.03
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355

Sr-doped carbon matrices for use as electrodes in autonomous electrical energy sources

A.A. Askarova¹, V.N. Nikolkin¹, D.S. Butakov^{1✉}, L.P. Sinelnikov¹, V.N. Rychkov²

¹ Institute of Reactor Materials, Zarechny, Russian Federation

² Ural Federal University, Yekaterinburg, Russian Federation

✉ butakov_ds@irmatom.ru

Abstract. Relevance. The necessity to create new safe energy sources that can meet the needs of production and medicine where the use of traditional energy sources is impossible or unprofitable. Such sources may include radioisotope power sources, in which energy production is ensured by the natural decay of radionuclides. The most important components of current sources such as supercapacitors are electrode materials, the characteristics of which determine the electrophysical characteristics of radioisotope sources. This work proposes a method for synthesizing a carbon matrix doped with Sr for use as electrodes of radioisotope power sources. **Aim.** Development, mastery and optimization of a method for synthesizing electrodes of radioisotope power sources based on carbon materials doped with the Sr-90 radioisotope. **Objects.** Carbon material doped with a radioisotope simulant Sr-90 (Sr stable). Carbon matrices were obtained by carbonizing a resorcinol-formaldehyde resin doped with a stable strontium salt. **Methods.** Scanning electron microscopy, low-temperature adsorption-desorption of nitrogen, cyclic voltammetry, galvanostatic charge-discharge, impedance microscopy. **Results.** A carbon matrix doped with a stable strontium isotope was synthesized by the method of semi-carbonization followed by physical activation with carbon dioxide. The structure, porosity and electrochemical characteristics of the material were studied. It was established that physical activation has a positive effect on the development of the specific surface area and mesoporosity of the samples of the synthesized matrix, as a result of which its electrochemical characteristics are improved. The method of physical activation is proposed as the most preferable for the synthesis of a carbon matrix doped with strontium isotopes for use as electrodes of radioisotope power supplies.

Keywords: radioisotope source, carbon matrix, resorcinol-formaldehyde resin, Sr isotope, physical activation, surface area, mesoporosity, electrical capacitance

For citation: Askarova A.A., Nikolkin V.N., Butakov D.S., Sinelnikov L.P., Rychkov V.N. Sr-doped carbon matrices for use as electrodes in autonomous electrical energy sources. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 135–142. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4355

Введение

В последние годы большое внимание уделяется разработке источников питания различных конструкций, обеспечивающих выработку энергии потребителю в течение длительного времени без подзарядки от внешнего источника электрического тока. С этой целью ведутся активные работы по созданию источников электрической энергии, основанных на прямом преобразовании энергии радиоактивного распада природных и искусственных радионуклидов [1]. В качестве источника излучения в таких источниках питания с многолетним ресурсом эксплуатации перспективным является использование ^{90}Sr , обладающего доступностью и относительно низкой стоимостью [2]. Для его практического применения в электродах разрабатываемых источников питания конденсаторного типа необходима разработка обладающей оптимальными свойствами специальной матрицы, допированной ^{90}Sr радионуклидом. В качестве электродных материалов часто используют углеродные материалы, полученные из различных прекурсоров. Многообразие аллотропных модификаций и морфологических типов делает углерод весьма перспективным для электрохимических областей применения: углеродные электроды хорошо поляризуются, являются химически инертными, устойчивы в широком диапазоне температур, амфотерность углерода позволяет использовать его как в качестве катода, так и в качестве анода [3].

Для синтеза углеродного материала, обладающего высокой емкостью, необходимо сформировать матрицу, обладающую большой площадью поверхности и определенным типом пор [4]. В настоящее время известны такие методы синтеза углеродных материалов с большой площадью по-

верхности, как методы жестких [5–8] и мягких шаблонов [9–11], гидротермальной обработки [6, 12–14] и методы химической [15–19] и физической [8, 15, 20] активации.

Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. В случае изготовления радиоизотопных источников питания (РИП) необходимо создание электродов на основе углеродных матриц, допированных радиоактивными источниками излучения. Методы, предполагающие использование кислот и ультразвука [6, 8, 15] для выщелачивания порообразователей (методы жесткого шаблона и химической активации), не могут быть использованы из-за возможного вымывания радионуклида из матрицы. Метод гидротермальной обработки не может быть использован, так как повышенная температура будет способствовать выщелачиванию допированного материала. Методы мягких шаблонов и химического осаждения из газовой фазы относятся к весьма дорогостоящим. В качестве наиболее перспективной технологии изготовления углеродных матриц рассматривается метод физической активации с использованием в качестве активирующего газа диоксида углерода или другого окисляющего газа при высоких температурах (750–1000 °C) с целью развития пористой иерархической структуры. В основе метода физической активации лежит реакция (1) частичного окисления углерода в присутствии окисляющего газа:



По сравнению с другими методами этот метод является наиболее простым и менее затратным, предполагает использование недорогого сырья и характеризуется достижением высокой удельной

площади поверхности (до 1000 м²/г) [4, 21]. Данный метод является термохимическим, так как сочетает в себе воздействие повышенной температуры и процесса окисления. Однако в литературе наиболее часто применяется термин «физическая активация» [15, 20, 21], поэтому при описании настоящего подхода использована устоявшаяся терминология.

В настоящей работе для исследования процесса изготовления РИП конденсаторного типа на основе углеродных матриц выполнен синтез углеродного материала, допированного имитатором изотопа Sr-90 – стабильным Sr, и проведена его активация для получения высокой удельной площади поверхности и пористости. Из полученного материала сформированы электроды, изготовлена двухэлектродная ячейка, и определены её электрические характеристики.

Материалы и методы

Для получения углеродной матрицы осуществлена следующая последовательность операций. В водном растворе объемом 3 мл SrCl₂, содержащем 2,56 мг стабильного стронция, растворяли 0,33 г резорцина. Далее к раствору прибавляли 1 мл раствора формалина с массовой концентрацией 37 %. Полученный трехкомпонентный раствор полимеризовали при 60 °С в закрытом состоянии 24 часа, далее при той же температуре в открытом виде в течение 24 часов.

Изготовленный порошок резорцин-формальдегидной смолы (РФС) подвергали последовательной карбонизации при 500 °С, затем при 900 °С в вакууме. Выдержка на каждом этапе составляла 1 ч, скорость нагрева 5 °С/мин. Процедура приготовления образца РФС+СО₂ отличалась тем, что на этапе обжига при 900 °С для активации поверхности выполнена обработка углеродной матрицы в среде СО₂.

Микроструктура обожженных порошков изучалась с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN Mira 3.

Удельную площадь поверхности и пористость образцов после обжига исследовали методом низкотемпературной адсорбции-десорбции азота с применением анализатора сорбции газов Nova 1200e фирмы Quantachrome.

Электрохимические характеристики (вольтамперометрия, циклы зарядки-разрядки, импедансная спектроскопия) были определены при помощи электрохимической станции Zive-MP2 по двухэлектродной схеме. Электроды для исследований получены с использованием порошка РФС и суспензии политетрафторэтилена методом каландрирования. Содержание порошка углеродного материала, полученного из резорцино-формальдегидной смолы, в электроде составляло 75–85 %.

Удельная электрическая емкость одного электрода рассчитана согласно уравнению (2) [6, 7, 17]:

$$C_{single} = \frac{2 \cdot I \cdot t}{\Delta U \cdot m}, \quad (2)$$

где I – ток разряда, А; t – время разряда, с; ΔU – падение напряжения, В; m – масса одного электрода, г.

Результаты исследования

Для изучения структуры поверхности образцов порошка резорцин-формальдегидной смолы после карбонизации получены изображения SEM, представленные на рис. 1, *a–d*. Принципиального различия структуры между РФС и РФС+СО₂ на уровне 50 мкм не обнаружено. Обоим материалам свойственна развитая поверхность и рыхлая структура, сформированная конгломерацией сферических микрочастиц размером около 1 мкм. Предполагается, что углеродный материал с такой структурой будет свободно контактировать с ионами электролита в электрохимической ячейке. Однако для РФС+СО₂ характерен несколько меньший размер частиц и большая неоднородность и пористость поверхности. Эти отличия, вероятно, вызваны частичным разрушением структуры РФС при активации окисляющим газом.

Исследование влияния физической активации с применением активирующего газа СО₂ на пористую структуру и состояние поверхности образцов РФС проведено при помощи методов ВЕТ и ВЖН. Как показано на рис. 2, *a*, для обоих материалов измеряемая величина быстро возрастает в интервале низких давлений <0,3 Р/Р₀, указывая на то, что поверхность образцов принадлежит к Н1 типу петель гистерезиса (согласно классификации IUPAC), что характерно для адсорбции в микропорах. Эти данные согласуются с данными кривых распределения пор по размерам, представленными на рис. 2, *b*. В действительности практически все поры, сформировавшиеся в процессе изготовления РФС и РФС+СО₂, являются микропорами. Полученные результаты измерений свидетельствуют о довольно узком интервале распределения пор по размерам: диаметр пор изменяется от 0,7 до 3 нм ($D_{meso}=2–50$ нм).

Результаты исследований удельной площади поверхности и объема пор для образцов материалов представлены в табл. 1. Удельная площадь поверхности для РФС составила 664 м²/г. Вклад микропор в общий объем пор для материала составляет 51 %. Для образца РФС+СО₂ измеренная удельная площадь поверхности составляет 1315 м²/г, при этом вклад микропор уменьшается и составляет 43 %. Полученные данные измерений свидетельствуют, что объем пор РФС+СО₂ практически в два раза превышает значения величины пористости для РФС. Таким образом, применение физической активации существенно увеличивает удельную площадь поверхности и объема пор РФС+СО₂.

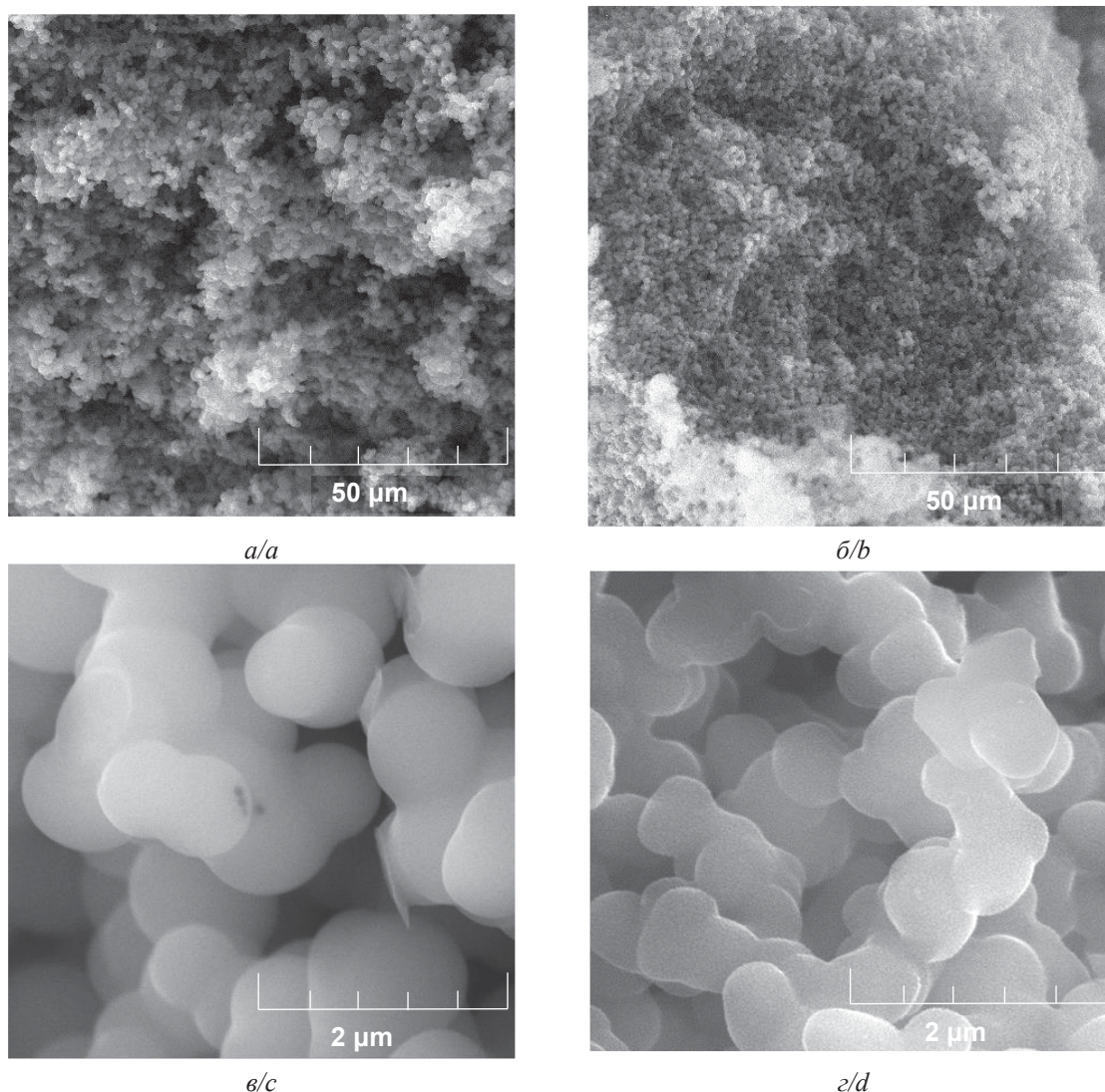


Рис. 1. Фотографии, полученные при помощи сканирующего электронного микроскопа, образцов РФС (а, в) и РФС+СО₂ (б, г)
Fig. 1. Photographs obtained using a scanning electron microscope, samples of PFC (a, c) and PFC+CO₂ (b, d)

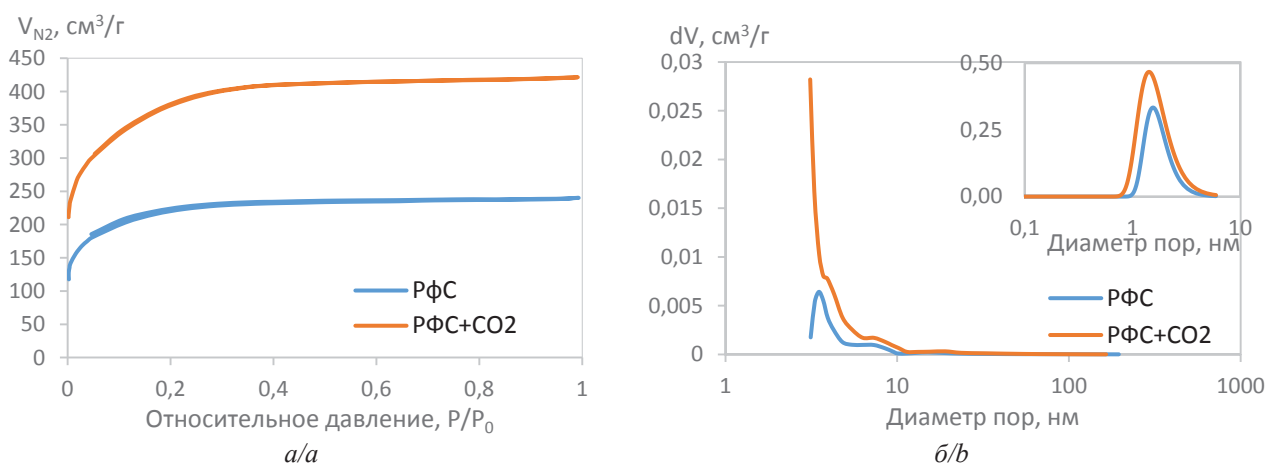


Рис. 2. Кривые определения характеристик поверхности: а) изотермы адсорбции-десорбции N₂; б) распределение мезопор по размерам (микропор во вставке)
Fig. 2. Curves for determination of surface characteristics a) adsorption-desorption isotherms of N₂; b) size distribution of mesopores of pores (micropores in the insert)

Таблица 1. Характеристики пористости и поверхности РФС и РФС+CO₂

Table 1. Characteristics of porosity and surface of РФС and РФС+CO₂

Образец Sample	Удельная площадь поверхности, м ² /г Specific surface area, m ² /g	Общий объем пор, см ³ /г Total pore volume, cm ³ /g	Объем микропор, см ³ /г Micropore volume, cm ³ /g	Доля микропор, % Microporosity fraction, %
РФС	664	0,372	0,199	51
РФС+CO ₂	1315	0,652	0,281	43

Электрохимические характеристики РФС и РФС+CO₂ исследовали в двухэлектродной ячейке. В качестве электролита использовали 1М раствор H₂SO₄ и ионную жидкость 1-бутил 3-метилимидазолия трифторметансульфата, растворенную в пропилен-карбонате с массовым соотношением 3:1 (далее в тексте – органический электролит). Для водного электролита окно напряжений составило 0-1 В, для органического – 0-2 В. На рис. 3, а, б показаны циклы вольтамперометрии в водном и органическом электролитах при скорости сканирования 3 мВ/с. Для образца РФС+CO₂ при проведении вольтамперометрических исследований получена более широкая площадь циклограммы, что характерно для высокой электрической емкости материала. Для данного образца наблюдается циклическая кривая, близкая к прямоугольной, что свойственно для суперконденсаторов с двойным электрическим слоем на поверхности электродов. Узкая циклограмма на графике, полученная при исследовании образца РФС, вероятно, является следствием большого количества микропор в материале и практически полного отсутствия мезопор, препятствующих образованию двойного электрического слоя на поверхности. Скругление вольтамперометрического цикла РФС+CO₂ при использо-

вании органического электролита обусловлено затруднением диффузии крупных ионов органического электролита в порах материала.

Гальваностатические кривые заряда-разряда получены при токах 1 мА/с и представлены на рис. 4, а, б для водного и органического электролитов. Можно отметить, что для кривых РФС+CO₂ характерна практически треугольная форма кривой. Это подтверждает предположения о простой диффузии ионов электролита по порам образцов и высокой обратимости заряда электрода, обнаруженной по результатам циклической вольтамперометрии. Падение напряжения в водном электролите H₂SO₄, соответствующее величине последовательного сопротивления ячейки, составило 0,321 и 0,008 В для РФС и РФС+CO₂ соответственно. Значения падения напряжения для этих же образцов в органическом электролите характеризуется величинами 0,368 и 0,138 В.

В табл. 2 представлены величины электрических емкостей образцов электродов РФС и РФС+CO₂ в различных средах. Электрическая емкость образца РФС в среде водного электролита практически в 30 раз превышает аналогичный параметр в органическом электролите. Для РФС+CO₂ эта разница сокращается до двух. Указанный факт подтверждает наличие более доступных пор в структуре образца РФС+CO₂, что облегчает диффузию крупных ионов органического электролита.

Таблица 2. Емкость образцов РФС и РФС+CO₂ в различных средах

Table 2. Capacity of РФС and РФС+CO₂ samples in various environments

Образец Sample	Емкость электрода, Ф/г / Electrode capacity, F/g	
	Раствор 1 М H ₂ SO ₄ Solution 1 M H ₂ SO ₄	Ионная жидкость Ionic liquid
РФС	8,7	0,3
РФС+CO ₂	84,3	47,8

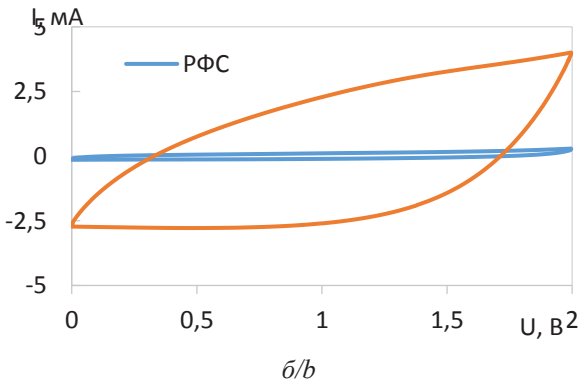
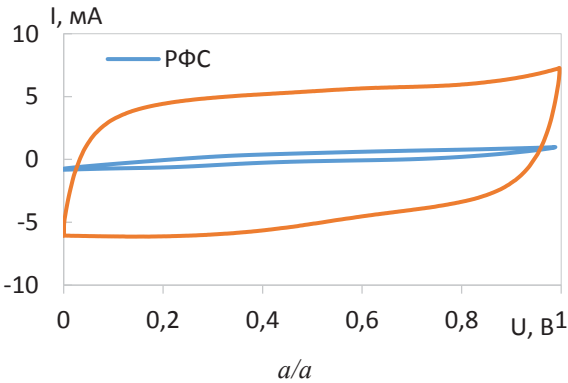


Рис. 3. Вольтамперометрические циклы РФС и РФС+CO₂: а) в 1М растворе H₂SO₄; б) в органическом электролите
Fig. 3. Voltammetric cycles of РФС and РФС+CO₂: а) in 1M H₂SO₄ solution; б) in organic electrolyte

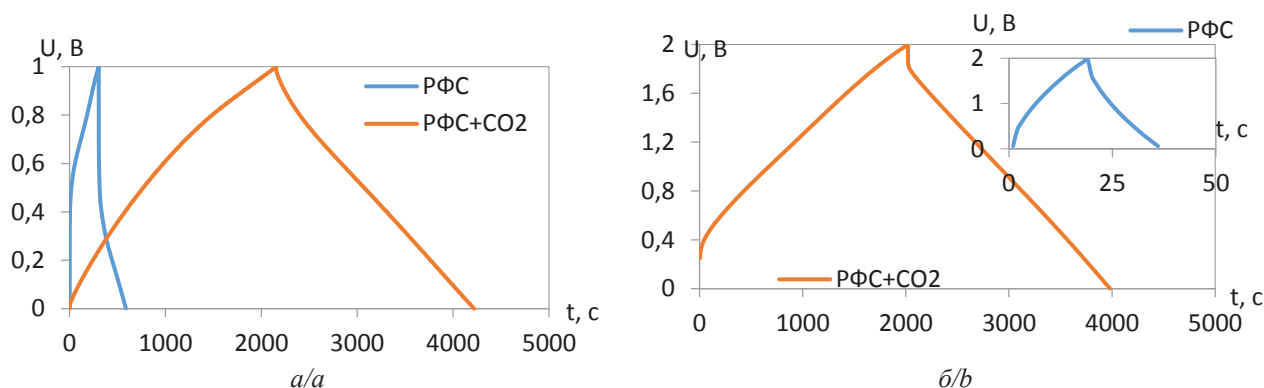


Рис. 4. Циклы заряда-разряда РФС и РФС+СО₂: а) в 1М растворе Н₂SO₄; б) в органическом электролите
Fig. 4. Charge-discharge cycles of PFC and PFC+CO₂: a) in 1M H₂SO₄ solution; b) in organic electrolyte

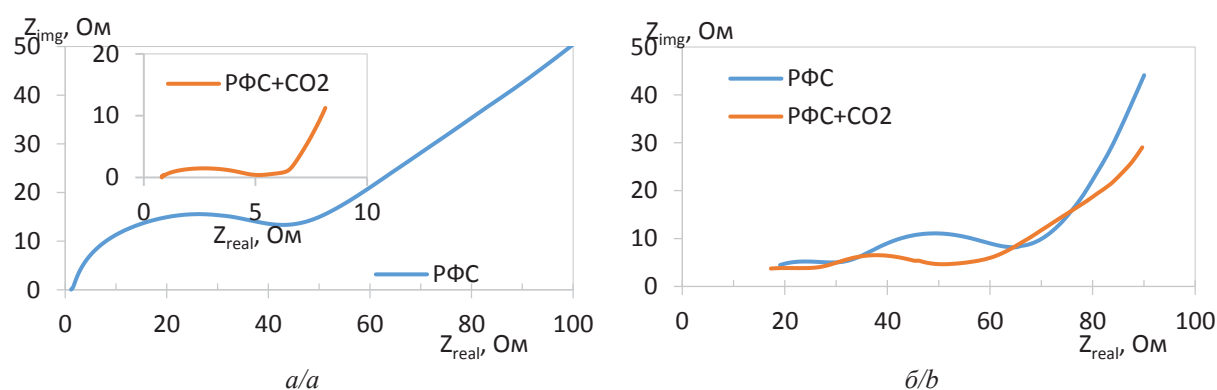


Рис. 5. Кривые импедансной спектроскопии РФС и РФС+СО₂: а) в 1М растворе Н₂SO₄; б) в органическом электролите
Fig. 5. Impedance spectroscopy curves for PFC and PFC+CO₂: a) in 1M H₂SO₄ solution; b) in organic electrolyte

Импедансная спектроскопия позволяет определить последовательное сопротивление R_s ячейки, которому соответствует контактное сопротивление проводов и корпуса ячейки, R_p сопротивление переноса заряда через двойной слой электрода и сопротивление диффузии ионов электролита.

Результаты импедансной спектроскопии представлены на рис. 5, а, б. Сопротивление R_s для электродов с РФС и РФС+СО₂ составляет 59 и 5 Ом в 1 М Н₂SO₄ и 74 и 55 Ом в органическом электролите соответственно. Для образца РФС+СО₂ в Н₂SO₄ характерен самый крутой наклон кривой, что свойственно для высокой скорости диффузии ионов электролита.

Обсуждение и заключение

В данной работе образцы углеродной матрицы, содержащей Sr, были синтезированы двумя способами: путем непосредственной карбонизации и с применением дополнительной физической активации с использованием СО₂ в качестве активирующего газа. Полученные экспериментальные результаты исследований показывают, что материалом с наилучшими характеристиками был образец после физической активации, удельная площадь поверхности и объем пор которого составляли 1315 м²/г и 0,652 см³/г. Так-

же для данного образца характерна наибольшая удельная электрическая емкость электрода 84,3 Ф/г. Электрическая емкость углеродной матрицы составляет 99,2 Ф/г. Данный эффект является результатом частичного разрушения поверхности углеродного материала в процессе физической активации, сопровождающегося улучшением поверхностных характеристик и, как следствие, повышением доступности поверхности материала ионам электролита.

Полученный результат близок к известным данным, имеющимся в зарубежной литературе, где говорится о величинах удельной площади поверхности 700–2000 м²/г и объемах пор 0,6–2,3 см³/г; удельная электрическая емкость данных материалов составляет от 100 до 110 Ф/г [8, 15, 20]. Таким образом, углеродная матрица, полученная в данной работе, соответствует техническому результату, достигнутому научным сообществом.

Подводя итог, можно отметить, что углеродная матрица, полученная путем предварительной карбонизации РФС с последующей физической активацией в атмосфере СО₂, является наиболее подходящим из исследованных материалов для допирования изотопом ⁹⁰Sr с целью применения в радиоизотопных источниках питания конденсаторного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоизотопные автономные источники питания (АИП): аналитический отчет / Н.В. Архангельский, А.В. Пономарев, Д.И. Сафиканов, П.Б. Птицын. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. – 101 с.
2. Наноструктурированные источники тока, возбуждаемые β -излучением, на основе углеродных нанотрубок / А.Н. Сауров, С.В. Булярский, В.Д. Рисованный и др. // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2015 – Т. 20 – № 5. – С. 474–480. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nanostrukturirovannye-istochniki-toka-vozbuzhdaemye-izlucheniem-na-osnove-uglerodnyh-nanotrubok/viewer> (дата обращения 03.07.2023).
3. Шорникова О.Н., Максимова Н.В., Авдеев В.В. Связующие для полимерных композиционных материалов. – М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2010. – 52 с. URL: <http://nano.msu.ru/files/master/I/materials/electrochemicalcapacitors.pdf> (дата обращения 16.06.2023).
4. P-doped hierarchical porous carbon aerogels derived from phenolic resins for high performance supercapacitor / Jia Guo, Dongling Wu, Tao Wang and et al. // Applied Surface Science. – 2019. – № 475. – P. 59–66.
5. High-capacitance KOH-activated nitrogen-containing porous carbon material from waste coffee grounds in supercapacitor / Chen-Hao Wang, Wei-Chen Wen, Hsin-Cheng Hsu and et al. // Advanced Powder Technology. – 2016. – Vol. 4. – P. 1387–1395.
6. Activated carbon xerogels derived from phenolic oil: basic catalysis synthesis and electrochemical performance / A. Sanchez-Sanchez, M.T. Izquierdo, S. Mathieu and et al. // Fuel Processing Technology. – 2020. – Vol. 205. – P. 1–12.
7. Facile preparation of water soluble phenol formaldehyde resin-derived activated carbon by Na_2CO_3 activation for high performance supercapacitor / Jinliang Zhang, Wenfeng Zhang, Hao Zhang and et al. // Materials Letters. – 2017. – Vol. 206. – P. 67–70.
8. Phenol-formaldehyde-resin-based activated carbons with controlled pore size distribution for high-performance supercapacitors / Neetu Talreja, Sung Hoon Jung, Le Thi Hai Yen and et al. // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 379. – P. 1–10.
9. One-pot synthesis of monodisperse phenolic resin spheres with high thermal stability and its derived carbon spheres as supercapacitor electrodes / Zhongguan Liang, Hui Xia, Luomeng Zhang and et al. // Results in Physics. – 2020. – Vol. 16. – P. 1–8.
10. Highly ordered mesoporous phenol-formaldehyde carbon as supercapacitor electrode material / Tingwei Cai, Min Zhou, Dayong Ren and et al. // Journal of Power Sources. – 2013. – Vol. 231. – P. 197–202.
11. Rich nitrogen-doped ordered mesoporous phenolic resin-based carbon for supercapacitors / Hao Chen, Min Zhou, Zhao Wang and et al. // Electrochimica Acta. – 2014. – Vol. 148. – P. 187–194.
12. Preparation and electrochemical performance of activated carbon microspheres from recycled novolak phenol formaldehyde / Mingjie Guan, Hui Li, Xianwen Chen and et al. // Waste Management. – 2021. – Vol. 201. – P. 635–641.
13. A novel synthesis of hierarchical porous carbons from interpenetrating polymer networks / Dazhang Zhu, Yawei Wang, Wenjing Lu and et al. // Carbon. – 2017. – Vol. 111. – P. 667–674.
14. Hydrothermal preparation of carbon microspheres from mono-saccharides and phenolic compounds / J.H. Ryu, Y.W. Suh, D.J. Suh and et al. // Carbon. – 2010. – Vol. 48. – P. 1990–1998.
15. Physical and chemical activation of graphene-derived porous nanomaterials for post-combustion carbon dioxide capture / R. Mohd Firdaus, A. Desforages, M. Emo and et al. // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11. – P. 1–14.
16. Hierarchically Fe-doped porous carbon derived from phenolic resin for high performance supercapacitor / Xiaoxi Dong, Jingyue Wang, Meifang Yan and et al. // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – P. 5998–6009.
17. Increase of porosity by combining semi-carbonization and KOH activation of formaldehyde resins to prepare high surface area carbons for supercapacitor applications / R. Heimböckel, S. Kraas, F. Hoffmann and et al. // Applied Surface Science. – 2018. – Vol. 427. – P. 1055–1064.
18. Biomass-derived porous carbons with tailored graphitization degree and pore size distribution for supercapacitors with ultra-high rate capability / Jingjing He, Deyi Zhang, Yulin Wang and et al. // Applied Surface Science. – 2020. – Vol. 515. – P. 1–12.
19. Activated carbons with well-developed mesoporosity prepared by activation with different alkali salts / Yuan Gao, Qinyan Yue, Shiping Xu and et al. // Materials Letters. – 2015. – Vol. 146. – P. 34–36.
20. Comparison studies on pore development mechanisms of activated hard carbons from polymeric resins and their applications for electrode materials / Hye-Min Lee, Kay-Hyeok An, Dong-Cul Chung and et al. // Renewable Energy. – 2019. – Vol. 144. – P. 116–122.
21. Díez N., Sevilla M., Fuertes A.B. Dense (non-hollow) carbon nanospheres: synthesis and electrochemical energy applications // Materials Today Nano. – 2021. – Vol. 16. – P. 1–32.

Информация об авторах

Анна Александровна Аскарова, инженер лаборатории радиоизотопных источников питания АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, askarova_aa@irmatom.ru

Виктор Николаевич Николкин, старший научный сотрудник лаборатории радиоизотопных источников питания АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, nikolkin_vn@irmatom.ru

Денис Сергеевич Бутаков, начальник лаборатории радиоизотопных источников питания АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, butakov_ds@irmatom.ru

Леонид Прокопьевич Синельников, кандидат технических наук, ученый секретарь, ведущий научный сотрудник АО «Институт реакторных материалов», Россия, 624250, г. Заречный, sinelnikov_lp@irmatom.ru

Владимир Николаевич Рычков, доктор химических наук, профессор кафедры редких металлов и наноматериалов Физико-технологического института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620078, г. Екатеринбург, ул. Мира, 21. v.n.rychkov@urfu.ru

Поступила: 14.08.2023

Прошла рецензирование: 17.09.2023

Принята к публикации: 23.05.2024

REFERENCES

1. Arkhangelsky N.V., Ponomarev A.V., Safikanov D.I., Ptitsyn P.B. *Radioisotope Autonomous Power Sources (AIP). Analytical report*. Moscow, TSAIR, private institution "Science and Innovations" Publ., 2021. 101 p.
2. Saurov A.N., Bulyarskii S.V., Risovany V.D. Nanostructured current sources excited by β -radiation based on carbon nanotubes. *Electronics*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 474–480. (In Russ.) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/nanostrukturirovannyye-istochniki-toka-vozbuzhdaemye-izlucheniem-na-osnove-uglerodnyh-nanotrubok/viewer> (accessed 3 July 2023).
3. Shornikova O.N., Maksimova N.V., Avdeev V.V. *Binders for polymer composite materials*. Moscow, State University named after M.V. Lomonosov Publ., 2010. 52 p. (In Russ.) Available at: http://nano.msu.ru/files/master/I/materials/electrochemical_capacitors.pdf (accessed 16 June 2023).
4. Jia Guo, Dongling Wu, Tao Wang. P-doped hierarchical porous carbon aerogels derived from phenolic resins for high performance supercapacitor. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 475, pp. 59–66.
5. Chen-Hao Wang, Wei-Chen Wen, Hsin-Cheng Hsu. High-capacitance KOH-activated nitrogen-containing porous carbon material from waste coffee grounds in supercapacitor. *Advanced Powder Technology*, 2016, vol. 27, no. 4, pp. 1387–1395.
6. Sanchez-Sanchez A., Izquierdo M.T., Mathieu S. Activated carbon xerogels derived from phenolic oil: Basic catalysis synthesis and electrochemical performance. *Fuel Processing Technology*, 2020, vol. 205, pp. 1–12.
7. Jinliang Zhang, Wenfeng Zhang, HaoZhang. Facile preparation of water soluble phenol formaldehyde resin-derived activated carbon by Na_2CO_3 activation for high performance supercapacitor. *Materials Letters*, 2017, vol. 206, pp. 67–70.
8. Neetu Talreja, Sung Hoon Jung, Le Thi Hai Yen. Phenol-formaldehyde-resin-based activated carbons with controlled pore size distribution for high-performance supercapacitors. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 379, pp. 1–10.
9. Zhongguan Liang, Hui Xia, Luomeng Zhang. One-pot synthesis of monodisperse phenolic resin spheres with high thermal stability and its derived carbon spheres as supercapacitor electrodes. *Results in Physics*, 2020, vol. 16, pp. 1–8.
10. Tingwei Cai, Min Zhou, Dayong Ren. Highly ordered mesoporous phenol–formaldehyde carbon as supercapacitor electrode material. *Journal of Power Sources*, 2013, vol. 231, pp. 197–202.
11. Hao Chen, Min Zhou, Zhao Wang. Rich nitrogen-doped ordered mesoporous phenolic resin-based carbon for supercapacitors. *Electrochimica Acta*, 2014, vol. 148, pp. 187–194.
12. Mingjie Guan, Hui Li, Xianwen Chen. Preparation and electrochemical performance of activated carbon microspheres from recycled novolak phenol formaldehyde. *Waste Management*, 2021, vol. 120, pp. 635–641.
13. Dazhang Zhu, Yawei Wang, Wenjing Lu. A novel synthesis of hierarchical porous carbons from interpenetrating polymer networks. *Carbon*, 2017, vol. 111, pp. 667–674.
14. Ryu J.H., Suh Y.W., Suh D.J. Hydrothermal preparation of carbon microspheres from mono-saccharides and phenolic compounds. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 7, pp. 1990–1998.
15. Mohd Firdaus R., Desforjes A., Emo M. Physical and chemical activation of graphene-derived porous nanomaterials for post-combustion carbon dioxide capture. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 1–14.
16. Xiaoxi Dong, Jingyue Wang, Meifang Yan. Hierarchically Fe-doped porous carbon derived from phenolic resin for high performance supercapacitor. *Ceramics International*, 2021, vol. 47, no. 5, pp. 5998–6009.
17. Heimböckel R., Kraas S., Hoffmann F. Increase of porosity by combining semi-carbonization and KOH activation of formaldehyde resins to prepare high surface area carbons for supercapacitor applications. *Applied Surface Science*, 2018, vol. 427, pp. 1055–1064.
18. Jingjing He, Deyi Zhang, Yulin Wang. Biomass-derived porous carbons with tailored graphitization degree and pore size distribution for supercapacitors with ultra-high rate capability. *Applied Surface Science*, 2020, vol. 515, pp. 1–12.
19. Yuan Gao, Qinyan Yue, Shiping Xu. Activated carbons with well-developed mesoporosity prepared by activation with different alkali salts. *Materials Letters*, 2015, vol. 146, pp. 34–36.
20. Hye-Min Lee, Kay-Hyeok An, Dong-Cul Chung. Comparison studies on pore development mechanisms of activated hard carbons from polymeric resins and their applications for electrode materials. *Renewable Energy*, 2019, vol. 144, pp. 116–122.
21. Díez N., Sevilla M., Fuertes A.B. Dense (non-hollow) carbon nanospheres: synthesis and electrochemical energy applications. *Materials Today Nano*, 2021, vol. 16, pp. 1–32.

Information about the authors

Anna A. Askarova, Engineer, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. askarova_aa@irmatom.ru

Viktor N. Nikolkin, Senior Researcher, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. Nikolkin_vn@irmatom.ru

Denis S. Butakov, Head of the Laboratory, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. butakov_ds@irmatom.ru

Leonid P. Sinelnikov, Dr. Sc., Leading Researcher, Institute of Reactor Materials, Zarechny, 624250, Russian Federation. sinelnikov_lp@irmatom.ru

Vladimir N. Rychkov, Dr. Sc., Professor, Ural Federal University, 21, Mira street, Yekaterinburg, 620078, Russian Federation. v.n.rychkov@urfu.ru

Received: 14.08.2023

Revised: 17.09.2023

Accepted: 23.05.2024