

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Российский химико-
технологический университет имени
Д.И. Менделеева» (ФГБОУ ВО «РХТУ им.
Д.И. Менделеева»)



Р.А. Козловский

11 июня 2026 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу **Берестова Валентина Викторовича «СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МИКРОВОЛНОВОЙ КАРБОНИЗАЦИЕЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.8 «Физика конденсированного состояния»**

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Берестова В.В. посвящена экспериментальному исследованию закономерностей формирования структуры и свойств углеродных материалов при микроволновой карбонизации отходов хлопкового производства в волноводной системе с бегущей волной. В работе показано, что применение концентрированного СВЧ-воздействия позволяет получать углеродные материалы с иерархической пористой структурой, которая обеспечивает эффективный транспорт ионов и высокую сохраняемость ёмкости при больших удельных токах (до 20 А/г) при использовании таких материалов в составе электродов электрохимических суперконденсаторов по сравнению углями, полученными методом традиционного нагрева. Отдельно изучено, как влияет на характер процесса синтеза и свойства получаемого материала тип используемой атмосферы на этапе карбонизации (рассмотрены CO_2 , N_2 , Ar). Выбранное сочетание исходного сырья (отходов текстильного производства) и предложенного метода карбонизации в микроволновой установке в режиме бегущей волны делает работу актуальной с точки зрения практического приложения для создания экологичных и недорогих электродных материалов для этого перспективного типа накопителей электрической энергии. В то же время установление корреляций между режимом микроволновой обработки, получаемой структурой и электрохимическими

свойствами делает работу чрезвычайно актуальной с научной точки зрения для физики конденсированного состояния в части понимания неравновесных процессов структурообразования при высокоинтенсивном микроволновом воздействии на углеродсодержащее сырьё.

Структура и объем диссертационной работы.

Структура диссертации содержит: введение, 5 глав, заключение, список использованных источников. Полный текст диссертации насчитывает 153 стр., основной текст содержит 98 рисунков и 19 таблиц. В списке литературы 149 источников. Автореферат диссертации насчитывает 25 страниц.

Научная новизна сформулирована во введении и выводах к диссертационной работе. К числу **наиболее важных научных результатов** можно отнести следующие:

- впервые углеродные материалы для электродов суперконденсаторов получены методом микроволновой карбонизации хлопковых отходов в волноводной системе с бегущей волной, обеспечивающей высокую и равномерную концентрацию электромагнитного поля; установлено, что разработанный подход позволяет сократить время синтеза более чем на порядок по сравнению с традиционной термической карбонизацией;
- обнаружено, что в условиях концентрированного СВЧ-воздействия в материале формируются уникальные структуры, отсутствующие при традиционной термической карбонизации: многостенные углеродные нанотрубки, фосфорсодержащие волокнистые структуры и фаза C_{70} , идентифицированные рентгеновским фазовым анализом;
- изучено влияние газовой среды (Ar , N_2 , CO_2) на стадии СВЧ-карбонизации в волноводной системе; показано, что использование CO_2 , выступающего в роли мягкого окислителя, позволяет достичь наиболее высокой температуры процесса ($1100\text{ }^{\circ}C$ против $950\text{ }^{\circ}C$ для Ar и $750\text{ }^{\circ}C$ для N_2) и сформировать иерархическую пористую структуру с объёмом мезопор $0,12\text{--}0,17\text{ см}^3/\text{г}$ и медианным размером мезопор $3,8\text{ нм}$, что обеспечивает наилучшие мощностные характеристики электродов с его использованием;
- обнаружено, что микроволновая карбонизация, в отличие от термической, формирует бимодальное распределение микропор (пики при $0,8\text{ нм}$ и $0,86\text{--}0,9\text{ нм}$). Несмотря на меньшую удельную поверхность ($499\text{--}748\text{ м}^2/\text{г}$ против $2050\text{ м}^2/\text{г}$ для термически карбонизованного угля), СВЧ-материалы за счёт развитой сети мезопор демонстрируют близкую к термическим аналогам удельную ёмкость (до 80 Ф/г) и лучшее сохранение ёмкости при высоких токах (работоспособность до 20 А/г , сохранение $95,5\%$ ёмкости после 20 000 циклов).

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке быстрого и энергоэффективного метода получения углеродных материалов из отходов хлопкового производства для электродов суперконденсаторов. На примере микроволновой карбонизации в волноводной системе с бегущей волной показано, что разработанный подход позволяет сократить время синтеза более чем на порядок (полный цикл около 4 минут, чистое СВЧ-воздействие 1 мин 50 с) по сравнению с традиционной термической карбонизацией (более 100 минут), что пропорционально снижает энергопотребление и расход технологических газов. Определены оптимальные параметры двухэтапного синтеза в разработанной волноводной установке: карбонизация в CO_2 (60 с, 1100 °С) с последующей активацией на воздухе (50 с). Показана критическая роль предварительной подготовки сырья: пропитки его 5 % H_3PO_4 и поддержания влажности для инициации процесса, а также установлено, что измельчение образца перед активацией повышает адсорбционную ёмкость получаемого активированного угля. Полученный из хлопкового пуха углеродный материал в нейтральном водном электролите (1М KNO_3) демонстрирует удельную ёмкость, близкую по значениям к материалам, полученным термическим методом, работоспособность при высоких плотностях тока и высокую ресурсную стабильность, что подтверждает его конкурентоспособность по сравнению с существующими коммерческими образцами. Разработанные вспомогательные методики (калибровка водяной нагрузкой, термоиндикаторный метод для визуализации распределения поля, непрерывное взвешивание образца, спектральная пирометрия) имеют самостоятельную ценность и могут быть использованы при создании промышленных СВЧ-установок для термической обработки диэлектрических материалов. Полученные результаты могут быть использованы для создания регламента переработки отходов текстильной промышленности (ООО «Ярцевский ХБК») в ценные углеродные материалы для систем накопления энергии. Такие исследования могут быть интересны как для научных организаций, занимающихся исследованиями в области физики конденсированного состояния, материаловедения и электрохимии (ИФТТ РАН, ОИВТ РАН, РХТУ им. Д.И. Менделеева, ИФХЭ РАН), так и для организаций и предприятий, осуществляющих научно-прикладную и производственную деятельность в области электроники и электроэнергетики (ООО «РЭНЕРА», АО «АВЭКС», АО «Авиавтоматика» им. В.В. Тарасова).

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием между данными, полученными при исследовании структуры углеродных материалов методами низкотемпературной адсорбции азота, рентгенофазового анализа, растровой и просвечивающей электронной микроскопии, а также результатами электрохимических

испытаний (циклическая вольтамперометрия, гальваностатический заряд-разряд, импедансная спектроскопия), которые демонстрируют непротиворечивость и воспроизводимость получаемых характеристик. Сопоставление свойств материалов, полученных микроволновым методом, с материалами, синтезированными традиционной термической карбонизацией, показало устойчивые корреляции между режимами обработки, структурными параметрами и электрохимическими характеристиками.

Результаты исследований опубликованы в ведущих научных журналах, индексируемых в международных базах данных, и представлены в виде докладов на российских и международных конференциях, соответствующих теме диссертации. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе подробно рассмотрены процессы формирования иерархической пористой структуры, однако было бы полезно более подробно обсудить влияние распределения пор по размерам на электрохимические характеристики материалов при различных плотностях тока.

2. В диссертационной работе показано влияние газовой среды на характеристики углеродных материалов, однако представляется целесообразным дополнительно рассмотреть влияние расхода и скорости подачи газов на воспроизводимость структуры материала, а также особенности учета данных параметров при масштабировании процесса и его реализации в промышленных условиях.

3. При обсуждении процессов формирования вторичных наноструктур представляет интерес более подробное рассмотрение механизма образования молекулярной фазы фуллерена C_{70} и отсутствие фазы C_{60} , которая образуется, как правило, в значительно больших количествах. Возможно, автор неправильно идентифицирует пики дифрактограммы.

4. В работе часто используется термин «вес» и производные от него вместо «масса».

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности выполненных исследований и не влияют на общую положительную оценку представленной диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа В.В. Берестова «СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОДОВ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МИКРОВОЛНОВОЙ КАРБОНИЗАЦИЕЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ

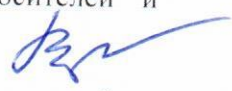
МАТЕРИАЛОВ» является законченной научной работой. В рамках исследования были получены новые результаты, которые представляют интерес как с научной, так и практической позиций. Работа соответствует специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния». Результаты исследования, выносимые на защиту, были представлены и описаны в 10 печатных работах, которые входят в международные базы данных Web of Science, Scopus и ВАК. Автореферат и публикации соответствуют содержанию диссертации.

По объему исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС П 710.05-24, предъявленным к диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Валентин Викторович Берестов, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Доклад по диссертации В.В. Берестова был заслушан на заседании кафедры химической технологии природных энергоносителей и углеродных материалов ФГБОУ ВО РХТУ им Д.И. Менделеева.

Отзыв был обсужден на заседании кафедры ХТПЭ и УМ ФГБОУ ВО РХТУ им. Д.И. Менделеева 04 июня 2026 г., протокол №2. Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата, публикаций и доклада Берестова В.В. На заседании присутствовало 10 сотрудников кафедры из 11. Результаты голосования: «за» – 10, «против» – нет, «воздержавшихся» – нет.

Составители отзыва:

профессор кафедры химической технологии природных энергоносителей и углеродных материалов д.х.н. профессор Бухаркина Татьяна Владимировна 

ассистент кафедры химической технологии природных энергоносителей и углеродных материалов к.т.н. Лучкин Максим Сергеевич 

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Адрес: 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9.

Тел.: 8(499) 978-86-60.

E-mail: pochta@muctr.ru