

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Берестова Валентина Викторовича на тему «Структура и функциональные свойства углеродных материалов электродов суперконденсаторов, полученных микроволновой карбонизацией целлюлозных материалов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» и состоявшейся в НИТУ МИСИС

25 июня 2026 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 13.04.2026, протокол № 38.

Диссертация выполнена на кафедре физической химии НИТУ МИСИС.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Кречетов Илья Сергеевич, доцент кафедры физической химии НИТУ МИСИС.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 38 от 13.04.2026) в составе:

1. Ховайло Владимир Васильевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС – председатель комиссии;
2. Саранин Данила Сергеевич, д.т.н., заведующий лабораторией перспективной солнечной энергетики НИТУ МИСИС;
3. Слепцов Владимир Владимирович, д.т.н., заведующий кафедрой 1204 «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»;
4. Громов Дмитрий Геннадьевич, д.т.н., профессор института перспективных материалов и технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»;
5. Задорожный Владислав Юрьевич, д.т.н., профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники федерального государственного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумба»;

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработана оригинальная экспериментальная методика микроволновой карбонизации и активации, реализованная в электродинамической системе волноводного типа с бегущей волной, которая обеспечивает высокую концентрацию электромагнитного поля и равномерность нагрева, использованная для получения углеродных материалов с контролируемыми структурными характеристиками из хлопковых отходов для электродов суперконденсаторов.
- разработаны новые вспомогательные методики: метод непрерывного измерения массы образца в процессе СВЧ-обработки на основе тензометрической системы,

а также методика количественной оценки распределения мощности СВЧ-поля с использованием термоиндикаторных сборок;

- предложены нетрадиционный подход к получению активированных углей, заключающийся в двухэтапной обработке в разработанной электродинамической системе, а также новые режимы синтеза, при которых использование CO_2 в качестве мягкого окислителя на этапе карбонизации выступает эффективным инструментом создания иерархической пористости, обеспечивающей оптимальный баланс между удельной поверхностью и транспортными свойствами.

- доказана перспективность использования микроволновой карбонизации в волноводной системе для получения электродных материалов суперконденсаторов из вторичного сырья: показано, что синтезированные материалы, обладая меньшей удельной поверхностью (до $748 \text{ м}^2/\text{г}$) по сравнению с аналогом, полученным традиционным методом термического нагрева ($2050 \text{ м}^2/\text{г}$), благодаря развитой иерархической пористости обеспечивают высокую ресурсную стабильность (сохранение 95,5 % ёмкости после 20000 циклов) и работоспособность при высоких удельных токах (до 20 А/г);

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- доказаны новые положения, вносящие вклад в расширение фундаментальных представлений о процессах структурообразования углеродных материалов в неравновесных условиях высокоинтенсивного СВЧ-нагрева, а именно возможности формирования иерархической пористой структуры и вторичных наноструктур при быстрой карбонизации целлюлозных материалов в волноводных системах с бегущей волной, что расширяет границы применимости микроволновых технологий в области синтеза углеродных материалов.

- применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс экспериментальных подходов, основанных на варьировании газовой среды (Ar , N_2 , CO_2) и параметров концентрированного СВЧ-воздействия, что позволило выявить роль газовой атмосферы как управляющего фактора в процессах карбонизации и активации целлюлозосодержащего сырья.

- изучены причинно-следственные связи между условиями СВЧ-обработки (газовая среда, характер нагрева, тип волноводной системы) и конечными структурными характеристиками углеродных материалов, включая формирование иерархической пористости и возможность возникновения вторичных наноструктур, что углубляет понимание генезиса структурных превращений в неравновесных термических условиях.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработаны и внедрены научно-технические основы эффективного и быстрого метода получения углеродных материалов для электродов суперконденсаторов из отходов хлопкового производства на базе волноводной СВЧ-установки с бегущей волной. Метод позволяет пропорционально сократить энергопотребление и расход технологических газов по сравнению с традиционной термической карбонизацией, что делает его экономически и экологически привлекательным (степень внедрения – на уровне созданной экспериментальной установки и отработанной технологической схемы, готовой к масштабированию).

- определены пределы и перспективы практического использования разработанной технологии: экспериментально установлены оптимальные режимы синтеза (мощность СВЧ, время обработки, газовая среда, геометрия образца) для получения активированного угля с высокими удельными характеристиками, что создаёт основу для масштабирования процесса от лабораторного до опытно-промышленного уровня и позволяет распространить результаты на другие виды целлюлозосодержащего сырья.

- создана система практических рекомендаций по выбору режимов микроволновой карбонизации и активации, обеспечивающая получение конкурентоспособного углеродного материала из вторичного сырья (хлопковый пух) с высокими электрохимическими свойствами: удельной ёмкостью до 80 Ф/г в нейтральном водном электролите (1М KNO₃), работоспособностью при высоких токах нагрузки (до 20 А/г) и высокой ресурсной стабильностью (сохранение 95,5 % ёмкости после 20000 циклов), что подтверждает эффективность предложенных решений для создания экологических систем накопления электрической энергии.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном оборудовании с использованием аттестованных методик: рентгеновский дифрактометр MiniFlex 600 (Rigaku, Япония), сканирующий электронный микроскоп EVO 40 (ZEISS, Германия), анализатор пористости Microtrac Belsorp miniX (MicrotracBEL Corp., Япония), многоканальный потенциостат Р-20Х8 и Р-45Х (Elins, Россия), анализатор ХИТ АСК2.5.10.8 (ООО «ЯРОСТАНМАШ», Россия); обоснованы калибровки СВЧ-установок, выполнена тщательная градуировка тензометрической системы для непрерывного измерения массы; показана воспроизводимость результатов исследования на более чем 150 образцах с применением статистической обработки данных в виде диаграмм размаха;

- идея базируется на анализе современного состояния исследований в области синтеза углеродных материалов из биомассы, включая обзор 149 литературных источников, и обобщении передового опыта по применению микроволновой карбонизации, а также на критическом анализе ограничений классических термических методов (высокие энергозатраты, длительность процесса, неравномерность нагрева);

- использовано сравнение авторских данных с данными, полученными ранее по рассматриваемой тематике: выполнено прямое сопоставление характеристик материалов, синтезированных в СВЧ-установках камерного типа и волноводного типа, с материалами, полученными традиционным термическим методом и с результатами, представленными в независимых источниках: значения удельной ёмкости (до 80 Ф/г) и сохранения ёмкости после 20 000 циклов (95,5 %) находятся в диапазоне значений, характерных для активированных углей из биомассы в нейтральных водных электролитах; температурные режимы СВЧ-карбонизации (750–1100 °С) согласуются с данными литературы; возникновение обнаруженных вторичных наноструктур (многостенные углеродные нанотрубки) соответствует известным механизмам каталитического роста в присутствии частиц Fe и других металлов, описанным в литературе;

- использованы современные методики сбора и обработки исходной информации, включая статистическую обработку экспериментальных данных, а также представительные выборки при исследованиях методом СЭМ, РФА и низкотемпературной адсорбции азота, что обеспечивает репрезентативность полученных результатов и

обоснованность выводов.

Личный вклад соискателя состоит в:

непосредственном участии на всех этапах исследовательского процесса: от разработки и адаптации методик до формулировки научных положений и выводов диссертации. Соискателем лично выполнен основной объем экспериментов по микроволновой карбонизации и активации в установках камерного и волноводного типа с бегущей волной, а также по термической карбонизации в трубчатой печи, включая подбор и оптимизацию режимов обработки (время, мощность, газовая среда, геометрия образцов). Автором самостоятельно проведена калибровка экспериментальных СВЧ-установок с использованием методов водяной нагрузки и термоиндикации, а также эксперименты по термогравиметрическому анализу в процессе СВЧ-обработки с применением разработанной системы непрерывного измерения массы. Автором лично проведен полный цикл электрохимических испытаний (циклическая вольтамперометрия, гальваностатический заряд-разряд, спектроскопия электрохимического импеданса, ресурсные испытания), включая подготовку электродных материалов, сборку электрохимических ячеек и обработку полученных данных. Соискателем выполнена систематизация, статистическая обработка и интерпретация всех экспериментальных данных с применением современных методов анализа, выявлены корреляции «условия синтеза – структура – свойства», сформулированы научные положения и выводы диссертации. При участии автора выполнены исследования методом сканирующей электронной микроскопии (подготовка образцов, интерпретация микроструктур, выявление типов морфологии активированных волокон и вторичных наноструктур) и определение адсорбционной ёмкости по метиленовому синему; при участии автора проводились рентгенофазовый анализ и исследования пористости методом низкотемпературной адсорбции азота. Автор принимал личное участие в апробации результатов исследования на международных и российских конференциях, а также в подготовке основных публикаций по выполненной работе. Постановка задач, обсуждение ключевых результатов и выводов проводились совместно с научным руководителем.

Соискатель представил 16 печатных работ по теме диссертации, из которых 10 научных статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук НИТУ МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Берестова Валентина Викторовича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании выполненных автором исследований:

представлено решение актуальной научной задачи по установлению взаимосвязей между условиями микроволновой карбонизации целлюлозных отходов в волноводной системе с бегущей волной и структурой, а также функциональными свойствами формируемых углеродных материалов; разработан высокоэффективный сверхбыстрый метод синтеза углеродных материалов с иерархической пористой структурой для электродов суперконденсаторов, позволяющий перерабатывать отходы текстильного производства в ценный продукт, что способствует развитию отечественной промышленной

отрасли систем накопления электрической энергии и решению задач импортозамещения. Содержание диссертации также соответствует квалификационным требованиям пункта 4 «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ» и пункта 6 «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами» паспорта специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Берестову Валентину Викторовичу ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



В.В. Ховайло

25.06.2026