«УТВЕРЖДАЮ»:
Проректор - начальник
Управления научной политики
МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН А.А. Федянин

«19» сентября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Факультета фундаментальной физико-химической инженерии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Диссертация «Электрохимическая стабильность и скорость падения емкости сернокислых растворов смесей сульфопроизводных антрахинона как электролита для накопителей энергии» выполнена на факультете фундаментальной физико-химической инженерии МГУ имени М.В. Ломоносова.

В 2022 году Чикин Дмитрий Владимирович окончил факультет нефтегазохимии и полимерных материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» по направлению подготовки «Химическая технология» с профилем образовательной программы «Материалы и технологии смарт энергосистем».

В период подготовки диссертации Чикин Д.В. обучался в очной аспирантуре факультета фундаментальной физико-химической инженерии МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.4.4. Физическая химия с 01.10.2022 по 30.09.2026. Диплом об окончании аспирантуры, подтверждающий сдачу кандидатских экзаменов, выдан в 2026 году.

Соискателем сданы кандидатские минимумы по двум специальностям. Оба экзамена по специальностям 1.4.4. Физическая химия и 1.4.6. Электрохимия сданы во время обучения в аспирантуре на ФФФХИ МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель:

Конев Дмитрий Владимирович, кандидат химических наук (02.00.04 – Физическая химия), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, отдел функциональных материалов для химических источников энергии, лаборатория электродных процессов в жидкостных системах, старший научный сотрудник.

По итогам обсуждения диссертации «Электрохимическая стабильность и скорость падения емкости сернокислых растворов смесей сульфопроизводных антрахинона как электролита для накопителей энергии» на заседании Ученого совета факультета фундаментальной физико-химической инженерии МГУ имени М.В. Ломоносова принято следующее заключение:

Работа Чикина Д.В. посвящена реализации органической проточной редокс-батареи на основе смеси сульфопроизводных антрахинона и микробного топливного элемента проточного типа с иммобилизованной на аноде антрахинон-2,7-дисульфокислотой. В работе установлен оптимальный состав смеси сульфопроизводных антрахинона для повышения ресурса батареи, получены коэффициенты диффузии, константы скорости переноса заряда и константы образования комплексов хингидронного типа для электролитов на основе сернокислых растворов смесей сульфопроизводных антрахинона, продемонстрирована электрохимическая стабильность иммобилизованного редокс-медиатора в ячейке с нулевым зазором.

Актуальность темы

Диссертационная работа Чикина Д.В. посвящена решению актуальной проблемы создания недорогих и экологичных систем хранения электроэнергии на основе органических электролитов. В условиях активного роста доли возобновляемых источников в энергетике особую актуальность приобретает

необходимость разработки эффективных стационарных накопителей энергии, позволяющих оптимизировать децентрализованный характер генерации электричества и поддерживать баланс между его выработкой и потреблением. Проточные редокс-батареи являются одним из наиболее перспективных решений, однако широко распространенные ванадиевые системы имеют высокую стоимость из-за использования дорогих металлических реагентов токогенерирующих реакций. В этой связи применение органических электроактивных соединений, в частности смесей сульфопроизводных антрахинона, которые могут быть получены из дешевого сырья одностадийным сульфированием, представляет значительный интерес. Известны примеры использования в проточных батареях отдельных компонентов смеси (2,7-AQDS – антрахинон-2,7-дисульфокислота), однако систематические исследования электрохимического поведения и стабильности неочищенных смесей сульфопроизводных антрахинона, а также влияние их состава на рабочие характеристики батарей практически отсутствуют. Часть работы посвящена повышению производительности микробных топливных элементов благодаря использованию 2,7-AQDS в качестве иммобилизованного редокс-медиатора в проточной ячейке с нулевым зазором, что также является актуальной задачей электрохимической энергетики. Таким образом, содержание работы Чикина Д.В. отвечает современным вызовам энергетики и электрохимии.

Новизна и практическая значимость работы

В диссертационной работе установлена зависимость между условиями синтеза смесей сульфопроизводных антрахинона (температура, время, загрузка SO_3) и их конечным составом, а также показано, что варьированием этих параметров можно направленно изменять соотношение компонентов. Количественно охарактеризовано влияние состава смеси на электрохимические параметры: показано, что константа скорости стадии переноса заряда возрастает с увеличением доли антрахинон-2-сульфокислоты в синтезированной смеси

сульфопроизводных антрахинона, однако также возрастает скорость падения емкости батареи. Установлен оптимальный состав смеси, обеспечивающий наилучшее сочетание мощностных характеристик и циклической стабильности в качестве электролита антрахинон-бромной проточной редокс-батареи. С помощью метода спектроэлектрохимии найдены константы образования хингидронного комплекса для всех индивидуальных сульфопроизводных антрахинона и смесей на их основе, а также выявлено влияние хингидронных комплексов на вязкость и массоперенос. Впервые апробировано использование иммобилизованного 2,7-AQDS в качестве редокс-медиатора в проточных ячейках микробного топливного элемента с нулевым зазором с инокулятом из природных отложений. Достигнута удельная мощность более 900 мВт/м² и продемонстрирована стабильность медиатора в течение двух месяцев испытаний.

Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности использования неочищенных смесей сульфопроизводных антрахинона в качестве доступного и стабильного неголита для проточных редокс-батарей. Применение простого одностадийного синтеза для получения смесей сульфопроизводных антрахинона оптимального состава позволяют многократно снизить стоимость электролита по сравнению с индивидуальными очищенными сульфопроизводными антрахинона при сохранении высоких эксплуатационных характеристик (удельная мощность ~183 мВт/см² при 100 % заряда батареи, скорость падения емкости менее 0,04 % за цикл).

Разработанный метод модификации углеродного войлока полипирролом с включением 2,7-AQDS и показанная высокая эффективность таких анодов в проточных микробных топливных элементах открывают перспективы для создания экономически целесообразных биоэлектрохимических систем для выработки электроэнергии синхронно с очисткой сточных вод и энергоснабжения различных автономных устройств в естественных и искусственных питательных средах.

Степень достоверности результатов исследований

Результаты работы регулярно докладывались на российских и международных конференциях, а также были опубликованы в российских и международных журналах. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием комплекса современных и взаимодополняющих физико-химических и электрохимических методов. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами других научных групп.

По результатам работы опубликованы 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus и относящихся к категории К1 по классификации ВАК Минобрнауки РФ. Результаты работы были представлены автором на 5 научных конференциях: XIV Международная научно-практическая конференция «Образование и наука для устойчивого развития» (Москва, 26-28 апреля 2022), Школа молодых ученых «Электроактивные материалы и химические источники тока» (Москва, 30 мая-5 июня 2022), Международный конгресс молодых ученых по химии и химической технологии «МКХТ-2022» (Москва, 18 октября 2022), XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2023» (Москва, 10-21 апреля 2023), II Всероссийская конференция с международным участием «Инновации в альтернативной энергетике: производство и накопление» (Дубна, 18-19 ноября 2024).

Плановый характер работы

Исследования по теме диссертации выполнены в рамках проектов Российского Научного Фонда (№ 21-73-30029) и внутреннего инициативного гранта РХТУ им. Д.И. Менделеева (№ ВИГ_2022_071).

Полнота опубликования результатов и ценность научных работ соискателя ученой степени

Основные идеи и положения работы изложены в 8 научных работах автора, в том числе 5 тезисов докладов на конференциях российского и международного уровней и 3 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных

для защиты как в диссертационном совете МГУ, так и ВАК при Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертаций.

Основные публикации по теме диссертации

1. Petrov M., Chikin D. и др. Tuning the composition of mixed anthraquinone derivatives towards an affordable flow battery negolyte // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2024. Т. 973. С. 118693. (Соискателем получены, обработаны и описаны экспериментальные результаты, подготовлен черновик статьи)
2. Pichugov R., Loktionov P., Verakso D., Pustovalova A., Chikin D., Antipov A. Sensitivity of Capacity Fade in Vanadium Redox Flow Battery to Electrolyte Impurity Content // Chempluschem. 2024. Т. 89. № 12. С. e202400372. (Соискателем получены и обработаны экспериментальные результаты)
3. Chikin D. и др. Boosting the performance of a zero-gap flow microbial fuel cell by immobilized redox mediators // ChemPlusChem. 2025. Т. 90. № 4. С. e202400586. (Соискателем подготовлен литературный обзор, получены, обработаны и описаны экспериментальные результаты, подготовлен черновик статьи)

Все статьи, выполненные в соавторстве, процитированы в диссертации в соответствии с п. 14 критериев Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.04.2013 г., с учетом всех последующих изменений. Результаты, описанные в диссертации, являются оригинальными, заимствованные материалы без ссылки на источник заимствования отсутствуют.

В опубликованных материалах изложены основные результаты работы. Методические аспекты, экспериментальные данные работы [1], а также выводы, свидетельствующие о перспективности применения неочищенных смесей сульфопроизводных антрахинона в качестве электролита проточных редокс-батарей отражены в главах 3 и 4, а также в заключении. Экспериментальные ячейки, используемые в качестве мембранно-электродного блока проточной редокс-батареи в работе [2], отвечают конструктивным особенностям ячеек проточного типа в экспериментах, результаты которых приведены в главах 3-5.

Экспериментальные результаты, методология и выводы работы [3] составляют основное содержание главы 5, а также отражены в заключении.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач, определение методик экспериментальных исследований и интерпретация полученных экспериментальных данных проводилась совместно с научным руководителем. Подготовка полученных результатов к публикации проводилась совместно с соавторами. Исследование редокс-поведения СА и ССА с дальнейшим расчетом коэффициентов диффузии и констант скорости переноса заряда (Глава 3 диссертации) было произведено в рамках совместной работы с Антиповой Л.З, при этом вклад соискателя является определяющим.

Смеси сульфопроизводных антрахинона были синтезированы в сотрудничестве с К.А. Карпенко на базе ИОХ РАН им. Н.Д. Зелинского. Также Карпенко К.А. проводил измерения и интерпретировал результаты ^{1}H ЯМР-спектроскопии, синтезированных ССА, производил отбор инокулята для анодов МТЭ со дна естественного водоема. Снимки СЭМ анодов МТЭ были получены Е.А. Колесниковым в присутствии автора на базе НИТУ МИСИС.

Соответствие диссертации научным специальностям, отрасли науки

Диссертационная работа Чикина Д.В. «Электрохимическая стабильность и скорость падения емкости сернокислых растворов смесей сульфопроизводных антрахинона как электролита для накопителей энергии» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена задача комплексного исследования электрохимических свойств неочищенных смесей сульфопроизводных антрахинона (2,7-AQDS, 2,6-AQDS и AQS) в качестве перспективного электролита для проточных редокс-батарей, а также оценена возможность применения 2,7-AQDS в качестве иммобилизованного редокс-медиатора для проточных микробных топливных элементов. По своему содержанию, объектам и методам исследования работа полностью соответствует паспорту научной специальности 1.4.6. Электрохимия. В диссертации методами

циклической вольтамперометрии и спектроэлектрохимии определены фундаментальные кинетические и термодинамические характеристики (коэффициенты диффузии, константы скорости переноса заряда и константы образования комплекса хингидронного типа) для индивидуальных сульфопроизводных и их смесей в сернокислых электролитах, что относится к п. 1 паспорта специальности, охватывающему экспериментальные и теоретические исследования закономерностей протекания электрохимических реакций, включая кинетику и механизмы электродных процессов, а также массоперенос в электрохимических системах. Проведенные заряд-разрядные испытания антрахинон-бромной проточной редокс-батареи со смесями различного состава в качестве электролита анодной полуячейки и установленные корреляции между составом смеси и ключевыми рабочими характеристиками батареи (удельной мощностью, КПД и скоростью падения емкости) соответствуют п. 10 паспорта, касающемуся разработки, исследования и моделирования химических источников тока и электрохимических преобразователей энергии. Измерения предельной растворимости, вязкости и свойств электролитов, а также изучение влияния кислотности на массоперенос и комплексообразование относятся к п. 1 и п. 14, который предусматривает развитие экспериментальных методов анализа электрохимических систем, включая спектроскопические и микроскопические исследования *in situ* и *operando*. Кроме того, реализованный в работе синтез модифицированных анодов (Полипиррол/AQDS) методом темплатной электрополимеризации и их успешное применение в качестве биоанодов проточных ячеек микробного топливного элемента с естественным инокулятом вписываются в п. 10 и п. 14, расширяя область применения электрохимических методов в биоэлектрохимии. Таким образом, диссертация Чикина Д.В. выполнена в рамках специальности 1.4.6. Электрохимия, охватывает как фундаментальные аспекты электрохимической кинетики и массопереноса органических соединений, так и прикладные задачи создания и испытания проточных энергонакопителей и биоэлектрохимических систем. Диссертация рекомендуется к защите по специальности 1.4.6. Электрохимия.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Чикина Дмитрия Владимировича «Электрохимическая стабильность и скорость падения емкости сернокислых растворов смесей сульфопроизводных антрахинона как электролита для накопителей энергии» соответствует всем критериям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.04.2013, с учетом всех последующих изменений, применительно к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук и рекомендуется к защите по специальности 1.4.6. Электрохимия (химические науки).

Заключение принято на заседании научно-технического совета факультета фундаментальной физико-химической инженерии МГУ имени М.В. Ломоносова. Присутствовало на заседании 5 чел. Результаты голосования: «за» – 5 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 1 от «11» сентября 2026 г.

Председатель совета
И.о. декана
факультета фундаментальной
физико-химической инженерии
МГУ имени М.В. Ломоносова
д.х.н., академик РАН Ю.Г. Горбунова

Ученый секретарь
Заведующий аспирантурой
факультета фундаментальной
физико-химической инженерии
МГУ имени М.В. Ломоносова
к.ф.-м.н. И.Р. Насимова