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

«29» сентября 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Диссертация «Шунтирующий ток в батареях химических источников тока с проточным электролитом» выполнена на факультете фундаментальной физико-химической инженерии МГУ имени М.В. Ломоносова.

В 2022 г. *Толстель Дмитрий Олегович* окончил факультет фундаментальной физико-химической инженерии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности «Фундаментальная и прикладная химия».

В период подготовки диссертации Толстель Д.О. 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 г. по 30.09.2026 г. Диплом об окончании аспирантуры, подтверждающий сдачу кандидатских экзаменов, выдан в 2026 г.

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 «Шунтирующий ток в батареях химических источников тока с проточным электролитом» на заседании Ученого совета факультета фундаментальной физико-химической инженерии МГУ имени М.В. Ломоносова принято следующее заключение:

Работа Толстеля Д.О. посвящена разработке и экспериментальной верификации модели распределения токов в многоэлементных батареях химических источников тока с проточным электролитом, количественной оценке шунтирующих потерь и выбору рациональной геометрии проточной части с учётом энергозатрат на циркуляцию электролита.

Актуальность темы

Проточные химические источники тока рассматриваются как перспективный класс систем стационарного накопления электроэнергии благодаря возможности независимого масштабирования мощности и энергоёмкости, высокому ресурсу циклирования и пригодности для длительной эксплуатации. При переходе от единичных электрохимических ячеек к многоэлементным батареям возникают специфические процессы, которые отсутствуют или несущественны на уровне отдельного мембранно-электродного блока и способны ограничивать эффективность всей системы.

Для батарей с жидкими электроактивными компонентами одной из характерных проблем являются шунтирующие токи. При последовательном электрическом соединении мембранно-электродных блоков общие контуры подачи электролита образуют паразитные электрические цепи, по которым

протекают токи, не совершающие полезной работы во внешней цепи. Они снижают фарадеевскую эффективность, вызывают саморазряд и могут приводить к локальному разрушению электродных и конструкционных материалов. Величина этих потерь определяется как режимом работы батареи, так и сопротивлением жидкостных путей, которое связано с составом электролита и геометрией каналов.

Повышение сопротивления распределительных каналов уменьшает шунтирующие токи, однако одновременно может увеличивать гидравлические потери и энергозатраты на циркуляцию электролита. Поэтому проектирование многоэлементных проточных батарей требует совместного рассмотрения электрических и гидравлических потерь. При этом параметры эквивалентно-схемных моделей шунтирующих токов нередко задаются по приближённым оценкам или подбираются по интегральным экспериментальным данным, что ограничивает их применение для прямого расчёта и оптимизации реальных батарей.

Цель работы Толстеля Д.О. состояла в разработке и экспериментальной верификации модели распределения тока в батарее химического источника тока с проточным электролитом, предназначенной для количественной оценки влияния конструктивных и режимных параметров на паразитные потери и для выбора рациональных параметров проточной части батареи с учётом гидравлических потерь.

Новизна и практическая значимость работы

Разработана модель шунтирующих токов в батарее проточного химического источника тока, основанная на представлении многоэлементного стека в виде эквивалентной электрической схемы, включающей мембранно-электродные блоки, подводящие каналы и магистрали. В отличие от упрощённых подходов, модель ориентирована на использование параметров, определяемых по экспериментально измеряемым характеристикам элементов батареи и их зависимости от степени заряжения.

Установлена степень влияния основных конструктивных и режимных параметров на шунтирующие потери. Для исследованной конструкции показано, что наибольшее влияние на снижение фарадеевской эффективности оказывают число мембранно-электродных блоков, рабочий ток батареи и сопротивление подводящих электродных каналов, тогда как сопротивление мембранно-электродного блока и геометрия магистрального канала влияют существенно слабее.

Предложен способ разделения фарадеевских потерь на составляющую, обусловленную шунтирующими токами, и остаточную составляющую, преимущественно связанную с кроссовером электроактивных компонентов через мембрану, на основании сопоставления расчётной и экспериментальной фарадеевской эффективности. Для стека ВПРБ из десяти последовательно соединённых МЭБ рабочей площадью 40 см² каждый при плотностях тока 50–225 мА/см² фарадеевская эффективность составила 90,70–96,07 %, при этом шунтирующие токи определяют 9,7–18,3 % суммарных фарадеевских потерь, а совокупность дополнительных потерь характеризуется эффективной плотностью тока саморазряда 3,15 ± 0,72 мА/см².

Предложен упрощённый расчётный подход к совместному учёту шунтирующих токов и гидравлических потерь при выборе геометрии проточной части многоэлементной батареи. Проточный тракт сложной геометрии представлен системой гидравлически связанных участков с аналитическим описанием линейных и локальных потерь и перепада давления в пористом электроде, что позволяет выполнять многовариантную оптимизацию без повторного пространственного гидродинамического моделирования каждого варианта.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной модели и созданного на её основе расчётного инструмента при проектировании многоэлементных проточных батарей для выбора числа и площади МЭБ, длины и сечения распределительных каналов, а также режимов работы с учётом одновременного ограничения шунтирующих токов и

энергозатрат на циркуляцию электролита. Для стека из десяти МЭБ рабочей площадью 40 см² каждый и проектной мощностью 100 Вт при плотности тока 150 мА/см² рациональному варианту соответствуют площадь сечения прямого участка 1,4 мм², длина 45 мм, ширина 1,0 мм и высота 1,4 мм; суммарные относительные электрогидравлические потери для выбранной геометрии составляют 2,8 %.

Практическую ценность имеет также разработанная конструкция многоэлементного стека, позволяющая регистрировать напряжения отдельных МЭБ и использовать эти данные для прямой проверки расчётной модели. Полученные экспериментальные зависимости напряжения разомкнутой цепи, электропроводности электролитов и сопротивления МЭБ и его компонентов от степени заряжения могут использоваться для параметризации и других моделей ванадиевых проточных батарей.

Степень достоверности результатов исследований

Достоверность и обоснованность результатов обеспечиваются использованием взаимодополняющих расчётных и экспериментальных методов, непосредственным экспериментальным измерением параметров, входящих в модель, а также сопоставлением расчётных предсказаний с характеристиками изготовленного многоэлементного стека. Полученные экспериментальные данные согласуются между собой и с опубликованными результатами исследований других научных групп.

По результатам работы в соавторстве опубликованы 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых системами Web of Science и Scopus. Результаты диссертационной работы были представлены автором на научных конференциях: «Электрохимия-2023: Всероссийская конференция по электрохимии с международным участием» (Москва, 23–27 октября 2023 г.) и 18-й конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные проблемы ионики твёрдого тела» (ФПИТТ-2026, Черноголовка, Московская область, 21–27 июня 2026 г.).

Плановый характер работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках тем Государственных заданий (рег. номер 124013000692-4, № 125012000470-0). Часть работы выполнена в рамках проектов Российского научного фонда № 21-73-30029, № 23-13-00428 и № 23-23-00555.

Полнота опубликования результатов и ценность научных работ соискателя ученой степени

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 3 статьях в профильных рецензируемых научных изданиях, индексируемых системами Web of Science и Scopus и входящих в список рекомендованных для защиты как в диссертационном совете МГУ, так и ВАК при Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертационных работ.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Glazkov A., Pichugov R., Loktionov P., Konev D., Tolstel D., Petrov M., Antipov A., Vorotyntsev M.A. Current Distribution in the Discharge Unit of a 10-Cell Vanadium Redox Flow Battery: Comparison of the Computational Model with Experiment // Membranes. 2022. Vol. 12. No. 11. Article 1167. DOI: 10.3390/membranes12111167. (Соискателем разработана использованная в работе расчётная модель распределения токов в многоэлементной ванадиевой проточной редокс-батарее, выполнено ее сопоставление с экспериментальными данными)

2. Istakova O.I., Konev D.V., Tolstel D.O., Ruban E.A., Krasikova M.S., Vorotyntsev M.A. A High Discharge Power Density Single Cell of Hydrogen-Vanadium Flow Battery // Russian Journal of Electrochemistry. 2024. Vol. 60. No. 9. P. 716–727. DOI: 10.1134/S1023193524700319. (Соискателем выполнено моделирование течения электролита в распределительных каналах водородно-

ванадиевой батареи, на основе результатов которого им спроектирована и изготовлена экспериментальная электрохимическая ячейка)

3. Istakova O.I., Konev D.V., Tolstel D.O., Vorotyntsev M.A. Equilibrium and Discharge Characteristics of a Single Cell of Hydrogen-Vanadium Battery with Electrolyte of Different Acidity // Russian Journal of Electrochemistry. 2025. Vol. 61. No. 5. P. 208–218. DOI: 10.1134/S102319352560018X. (Соискателем выполнено моделирование течения электролита в распределительных каналах водородно-ванадиевой батареи, на основе результатов которого им спроектирована и изготовлена экспериментальная электрохимическая ячейка. Проведена обработка экспериментальных данных в части измерения напряжения разомкнутой цепи, электропроводности электролитов и интерпретация полученных результатов)

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

В опубликованных материалах отражены результаты, использованные при построении и экспериментальной параметризации модели. В работе [1] представлено эквивалентно-схемное описание распределения токов в 10-элементной ВПРБ и сопоставление расчёта с экспериментом; данный подход получил дальнейшее развитие в главах 2–4 диссертации. Работы [2] и [3] посвящены экспериментальному исследованию единичной водородно-ванадиевой ячейки и её характеристик при различных условиях; конструкции ячеек и полученные характеристики использованы в диссертации при разработке экспериментальных методик и определении параметров, необходимых для моделирования. Таким образом, опубликованные работы отражают основные расчётные и экспериментальные составляющие диссертационного исследования.

Личный вклад автора

Личный вклад Толстеля Д.О. состоит в разработке расчётного подхода к описанию шунтирующих токов в батареях химических источников тока с проточным электролитом, изготовлении экспериментальных объектов исследования, проведении электрохимических измерений и обработке полученных результатов. Все расчётные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором. Соискателем изготовлены единичные ячейки и многоэлементный стек, а также выполнены экспериментальные исследования на нём. Результаты экспериментальных работ, выполненных и опубликованных в соавторстве, использованы в диссертации в той части, которая необходима для параметризации построенной автором модели и сопоставления расчётных и экспериментальных данных. Анализ и интерпретация результатов выполнены лично соискателем. Все работы, выполненные в соавторстве, процитированы в тексте диссертации.

Соответствие диссертации научной специальности, отрасли науки

Диссертационное исследование Толстеля Д.О. «Шунтирующий ток в батареях химических источников тока с проточным электролитом» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой разработана и экспериментально верифицирована модель распределения токов в многоэлементной батарее с проточным электролитом и предложен подход к выбору рациональной геометрии проточной части с совместным учётом шунтирующих токов и гидравлических потерь.

В работе на основе эквивалентной электрической схемы сформировано описание токораспределения в стеке, учитывающее зависимость напряжения на мембранно-электродных блоках от соотношения различных ионных форм ванадия в электролите, электрическое сопротивление подводящих каналов и магистрали, а также изменение экспериментально определяемых параметров с составом и степенью заряжения электролита. Установлено влияние количества

МЭБ, рабочего тока и сопротивления подводящих каналов на шунтирующие потери и показан рост их вклада при масштабировании батареи.

На изготовленном стеке из десяти МЭБ проведено прямое сопоставление расчётной и экспериментальной фарадеевской эффективности заряд-разрядного цикла и выделены составляющие потерь, обусловленные шунтирующими токами и саморазрядом вследствие кроссовера соединений ванадия через мембрану. Модель объединена с аналитическим расчётом гидравлических потерь; показано, что основной вклад в электрическое сопротивление подводящих каналов вносит прямой участок, который выбран в качестве объекта совместной электрогидравлической оптимизации.

Диссертационная работа соответствует научной специальности 1.4.6. Электрохимия (химические науки), в частности пунктам паспорта специальности 10 «Электрохимическая генерация, передача и хранение энергии; оптимизация электролитов, электродных материалов, сепараторов и мембран. Теория, исследование и моделирование химических источников тока (первичных элементов, аккумуляторов, топливных элементов, суперконденсаторов, проточных редокс-батарей). Устройства для преобразования и временного запасания электрической энергии» и 14 «Развитие экспериментальных методов анализа электрохимических систем. Теоретические основы электрохимических, электроаналитических и комбинированных методов». Полученные результаты относятся к моделированию и экспериментальному исследованию многоэлементных проточных электрохимических систем и направлены на повышение эффективности их функционирования. Представленная диссертация рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата химических наук по научной специальности 1.4.6. Электрохимия.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация Толстеля Дмитрия Олеговича «Шунтирующий ток в батареях химических источников тока с проточным электролитом»

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 научной 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