УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе и цифровому развитию
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
доктор физ.-мат. наук, профессор
_____ Короновский А.А.
01 ____ 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Бороздина Алексея Вячеславовича «Электродные процессы на границе алюминия с хлоралюминатной ионной жидкостью на основе гидрохлорида триэтиламина», представленной на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

Актуальность темы диссертационной работы.

Созданию систем хранения энергии высокой емкости уделяется особое внимание в связи с необходимостью обеспечения труднодоступных районов электроэнергией.

В этой связи алюминий-ионные аккумуляторы (АИА) привлекают большое внимание благодаря богатому запасу алюминия в земной коре, безопасности и большой теоретической емкости алюминиевого металлического анода (2978 мА·ч·г$^{-1}$ и 8034 мА·ч·мл$^{-1}$). На сегодняшний день основным фактором, препятствующим успешной коммерциализации АИА, является сложность подбора оптимального состава электролита. Наиболее перспективны в этом отношении хлоралюминатные ионные жидкости (ИЖ) на основе хлоридов 1-этил-3-метилимидазолия (EMImCl), 1-бутил-3-метилимидазолия (BMImCl) и гидрохлорида триэтиламина (Et_3NHCl). Они обладают высокой термической устойчивостью и негорючестью, у них низкое давление паров, широкое окно электрохимической стабильности и относительно высокая электропроводность. Поэтому систематическое исследование физико-химических свойств низкотемпературных хлоралюминатных ионных жидкостей в широком диапазоне концентраций хлорида алюминия, а также установление закономерностей электродных

процессов на границе алюминия с хлоралюминатной ионной жидкостью и возможности их использования в качестве электролита алюминий-ионного аккумулятора, чему и посвящена диссертационная работа, является, несомненно, актуальной задачей.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния света определен ионный состав электролитов $AlCl_3$–Et_3NHCl, $AlCl_3$–EMImCl и $AlCl_3$–BMImCl в зависимости от содержания хлорида алюминия.

Для ионной жидкости $AlCl_3$–Et_3NHCl впервые получена фазовая диаграмма и определены зависимости вязкости и плотности в широком диапазоне температур и концентраций хлорида алюминия. Проведено сравнение с аналогичными свойствами систем $AlCl_3$–EMImCl и $AlCl_3$–BMImCl.

Проведены комплексные исследования транспортных свойств систем $AlCl_3$–Et_3NHCl, $AlCl_3$–EMImCl и $AlCl_3$–BMImCl, включающие измерения электропроводности, чисел переноса ионов и коэффициентов диффузии аниона $Al_2Cl_7^-$. Показано, что электропроводность в них обеспечивается за счет вязкого движения частиц.

Впервые получены стационарные поляризационные характеристики анодного растворения алюминия в трех хлоралюминатных ИЖ, а также изучен процесс переноса заряда на границе алюминий|ИЖ и его зависимость от состава электролита в диапазоне N=1.1-2.0 и температурах 30-145°C.

Рассчитаны коэффициенты переноса, константы скорости и энергии активации электрохимической реакции.

Показано, что пассивация алюминиевого электрода при анодном растворении алюминия вызвана образованием осадка $AlCl_3$, блокирующего поверхность электрода.

Показано, что катионный состав ИЖ в значительной степени определяет физико-химические свойства электролита, однако практически не влияет на кинетику электродных процессов.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработана оригинальная конструкция электрохимической ячейки, позволившая впервые методом спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния *in situ* исследовать влияние катодного и анодного потенциала, приложенного к алюминиевому электроду, на концентрационный профиль хлоралюминатных ионов в приэлектродном слое.

Определены оптимальные составы электролитов для создания АИА, которые составили N=1.65 для $AlCl_3$–EMImCl, N=1.63 для $AlCl_3$–BMImCl и N=1.78 для $AlCl_3$–Et_3NHCl.

Создан макет АИА, емкость которого на грамм катодного материала составила 97 $мА{\cdot}ч{\cdot}г^{-1}$ при кулоновской эффективности 97-98 %, а напряжение разомкнутой цепи − 1.5 В в течение 650 циклов.

Достоверность и обоснованность. Применение в работе комплекса современных физико-химических и электрохимических методов исследования (ГКР-спектроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия, дилатометрический, капиллярный методы, метод импедансной спектроскопии, хронопотенциометрический и хроноамперометрический методы) соответствует решаемым задачам.

Непротиворечивость полученных данных и их согласованность с литературными сведениями обеспечивает достоверность представленных результатов и их соответствие мировому уровню. Несомненным достоинством работы является грамотная обработка экспериментальных результатов методами математической статистики.

Диссертационная работа характеризуется внутренним единством. Полученные результаты соответствуют поставленным целям и задачам, а защищаемые положения вполне обоснованы. Автореферат диссертации полностью отражает основные идеи и выводы, приведенные в диссертации.

Апробация результатов исследования. Основные результаты изложены в 11 статьях в рецензируемых научных журналах, входящих в Перечень ВАК, а также доложены на 12 российских и международных конференциях.

Содержание и качество опубликованных автором работ соответствуют содержанию диссертации и заявленной специальности 1.4.6 Электрохимия. Направление исследований отвечает следующим пунктам паспорта этой специальности: п.1. «Термодинамические и транспортные свойства жидких ионпроводящих систем» (плотность и электропроводность хлоралюминатных ионных жидкостей); п.10. Электрохимическая генерация, энергии; оптимизация электролитов. Теория, исследование и моделирование химических источников тока (алюминий-ионных аккумуляторов).

Полученные в диссертации результаты могут быть использованы работниками научно-исследовательских организаций (Институт физической химии и электрохимии РАН имени А.Н. Фрумкина, Инновационный центр «Сколково», Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН) и

сотрудниками ВУЗов, занимающихся разработкой химических источников тока, а также для обучения студентов - будущих специалистов в области электрохимии и технологии электрохимических производств (ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»).

При прочтении диссертации возникли следующие **вопросы, замечания, пожелания**:

1. Схема ячейки и импеданс (рис. 3.2.) характерны для ячейки с твердым электролитом и блокирующими электродами. Как вы доказывали, что полуокружность (дуга) определяется свойствами электролита, а не характеризует процесс, происходящий на границе электрод-электролит? Исследовалось ли влияние изменение амплитуды подаваемого напряжения на форму полукруга? Общепринятое обозначение сопротивления электролита R_e, а не $\theta_{эл}$.

2. Удельная электропроводность (рис. 3.4.) практически не зависит от концентрации хлорида алюминия в кислой области при температуре 25С.

3. В уравнении Аррениуса (ур. 3.6) пропущен знак минус под экспонентой.

4. В тексте диссертационной работы не приводятся доказательства того, что при определении чисел переноса ионов по методу Гитторфа изменение количества Et_3NHCl прямо пропорционально числу переноса именно катиона. И насколько статистически значимо полученное различие средних значений чисел переноса катиона и аниона?

5. Резкий скачок потенциала на хроноамперограмме (рис.3.12) связываете только с зародышеобразованием. Учитывались ли скачок потенциала, соответствующий падению напряжения между рабочим электродом и электродом сравнения, а также заряжение ДЭС?

6. Какие есть предположения о причине снижения удельной электропроводности систем с ростом содержания хлорида алюминия в области относительного содержания $N > 1$?

7. Проводилась ли линеаризация полученных хроноамперограмм в различных координатах с целью определения коэффициентов диффузии, механизма нуклеации, процессов адсорбции?

8. Плотность тока обмена определяли из импедансных измерений. Как доказывали, что элемент θ в эквивалентной схеме это сопротивление переносу заряда? Определяли ли плотность тока обмена из поляризационных кривых при малых перенапряжениях по уравнению Тафеля?

9. В кинетических уравнениях (ур. 4.12) используются концентрации, а не активности.

10. Как кубическая форма язв в соответствии с РЭМ-изображением поверхности электрода на стр. 95 связана именно с гранецентрированной решеткой алюминия?

11. На каком основании полученные пики на циклических вольтамперограммах для макета АИА (рис. 5.2) относили к интеркаляции и деинтеркаляции хлоралюминатных ионов в структуру углерода?

Заключение. Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее научной ценности. Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований установлены закономерности электродных процессов на границе алюминия с хлоралюминатными ионными жидкостями, имеющие значение для развития электрохимии ионных жидкостей и создания алюминий-ионных аккумуляторов.

По объему, актуальности тематики, достоверности и научной новизне полученных результатов, ценности для науки и практики диссертационная работа Бороздина Алексея Вячеславовича «Электродные процессы на границе алюминия с хлоралюминатной ионной жидкостью на основе гидрохлорида триэтиламина» отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

Диссертация доложена и обсуждена на заседании кафедры физической химии ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (протокол № 2 от 02.09.2026)

Отзыв ведущей организации на диссертацию Бороздина Алексея Вячеславовича подготовлен Бурашниковой М. М.

Бурашникова Марина Михайловна
профессор кафедры физической химии,
доктор химических наук по специальности
02.00.05 - электрохимия, доцент
Телефон: +7(8452)51-64-13
Электронная почта: burashnikova_mm@mail.ru

Казаринов Иван Алексеевич
Заведующий кафедрой физической химии
доктор химических наук по специальности
02.00.05 - электрохимия, профессор
Телефон: +7(8452)51-64-13
Электронная почта: kazarinovia@mail.ru

Сведения о ведущей организации:
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский
государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская 83.
Сайт: www.sgu.ru, тел. +7 (8452) 26-16-96, e-mail: rector@sgu.ru

Подпись Бурашниковой М.М. удостоверяю
Ученый секретарь
Ученого совета С.В. Семенова
«01» 09 2026 г.

Подпись Казаринова И.А. удостоверяю
Ученый секретарь
Ученого совета С.В. Семенова
«01» 09 2026 г.