

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ И СЕЛЕКТИВНОСТИ МЕМБРАН ДЛЯ НАТРИЙ-ИОННЫХ ПРОТОЧНЫХ БАТАРЕЙ

Букалова С.Н.<sup>1</sup>, Баринов М.А.<sup>1</sup>, Тарасов С.Д.<sup>1</sup>, Леончук С.С.<sup>1</sup>  
Научный руководитель – доктор хим. наук, профессор Виноградов В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

[bukalova@scamt-itmo.ru](mailto:bukalova@scamt-itmo.ru)

Работа выполнена в рамках проекта ИТМО Collab 2026 «Разработка низкотемпературного проточного аккумулятора на базе синтетических натрий-ионных мембран».

Современные методы характеризации натрий-проводящих полимерных мембран, как правило, разделяют оценку их ионной проводимости (электрохимическая импедансная спектроскопия, EIS) и селективности (длительные измерения кроссовера редокс-активных видов). Это не позволяет напрямую связать фундаментальные свойства переноса заряда с работой мембраны в условиях, приближенных к реальным. В то время как работы Patel и др. [1] демонстрируют пути преодоления этих барьеров в твердотельных проводниках, для пористых полимерных мембран проблема «сольватационного трения» и его вклада в общее сопротивление ячейки остается неизученной. В данной работе мы предлагаем новый операндо-метод, основанный на анализе предельного диффузионного тока в модифицированной симметричной ячейке. В работе впервые используются нейтральные молекулы растворителя в качестве «пассивных диффузионных зондов», чей перенос через мембрану возможен исключительно за счет ион-дипольного взаимодействия с мигрирующими ионами Na<sup>+</sup>.

Научная новизна подхода заключается в сочетании гальваностатической поляризации псевдо-симметричной ячейки (с разными растворителями в анолите и католите) с последующим спектроскопическим анализом, что позволит оценить влияние сольватационного увлечения растворителя. Кроме того, разделение активационных барьеров позволит показать, что эффективная энергия активации ( $E_{a,app}$ ), полученная из температурной зависимости тока [2], включает в себя вклады как от процесса десольватации иона на входе в мембрану, так и от вязкости среды внутри набухшей мембраны. Варьируя природу растворителя (донорное число, диэлектрическую проницаемость), становится возможным экспериментально разделить эти вклады и установить корреляцию между  $E_{a,app}$  и энтальпией сольватации Na<sup>+</sup>. Также, будет произведен учет гидродинамики: впервые будет исследовано влияние скорости прокачки электролита в проточной ячейке на предельный диффузионный ток, что позволит отделить диффузионные ограничения в объеме электролита от истинной кинетики переноса через мембрану и ее приповерхностный слой, приближая модельный эксперимент к условиям работы реальных редокс-проточных батарей.

В качестве референсной системы выступает мембрана Nafion в Na-форме и модельная йод-йодидная редокс-система. Растворителями были выбраны вещества с контрастными свойствами: вода, изопропанол, диглим, диметилформамид, ацетон и ацетонитрил.

Предложены взаимосвязанные параметры для характеристики транспортных свойств мембран. Исследована зависимость степени набухания мембраны от природы растворителя. Проведён анализ температурной зависимости тока короткого замыкания

с построением Аррениусовских зависимостей для оценки эффективной энергии активации. Установлена корреляция между активационными барьерами и параметрами растворителя. В проточной ячейке предложен анализ зависимости тока короткого замыкания от скорости прокачки для разделения диффузионных и кинетических вкладов.

Ожидается, что предлагаемый подход позволит создать универсальную шкалу «средства» мембрана-растворитель, предсказывающую как ионную проводимость, так и селективность, что критически важно для разработки новых материалов для энергетики.

### **Литература**

[1] Patel S. K. et al. Approaching infinite selectivity in membrane-based aqueous lithium extraction via solid-state ion transport //Science Advances. – 2025. – V. 11. – №. 9. – P. eadq9823

[2] Meddings N., Owen J. R., Garcia-Araez N. Operando Evaluation of Selectivity and Transference Number of Lithium-Conductive Membranes //ChemElectroChem. – 2019. – V. 6. – №. 6. – P. 1678-1682.