

## **Проект Российского научного фонда 19-19-00381 «Конкурентный перенос ионов в электро-баромембранных процессах»**

На кафедре физической химии факультета химии и высоких технологий Кубанского государственного университета завершается третий этап реализации проекта «Конкурентный перенос ионов в электро-баромембранных процессах» под руководством профессора, доктора химических наук Никоненко Виктора Васильевича.

Проект направлен на решение задачи экономически и экологически эффективного разделения нескольких ионов, имеющих одинаковый знака заряда. Такая задача является весьма актуальной на сегодняшний день – например, для создания литий-ионных аккумуляторов требуется извлечение из природных рассолов ионов  $\text{Li}^+$ , для обезвреживания сточных вод необходимо удаление ионов тяжелых металлов. Мембранные процессы обессоливания, концентрирования и разделения ионов доказали свою экологическую и экономическую целесообразность. В настоящее время для разделения ионов используется две группы мембранных методов: в одной из них движущей силой является градиент внешнего электрического поля и используются главным образом ионообменные мембраны, это электро-баромембранные методы. Во второй группе методов движущая сила задается наложением градиента давления (баромембранные методы), используются нанофильтрационные мембраны. В то же время такие методы малоэффективны при разделении ионов одинаковой валентности, например,  $\text{Li}^+$  и  $\text{K}^+$ . В данном проекте развивается электро-баромембранный метод, в котором разделение происходит под действием одновременно наложенных двух движущих сил – электрической силы и силы давления. Силы направлены в противоположные стороны. Разделение достигается благодаря тому, что скорость электрического переноса иона пропорциональна его подвижности, а скорость конвективного переноса одинакова для всех ионов. Можно подобрать такие значения движущих сил, при которых перенос одного из конкурирующих ионов становится равным нулю, тогда как другой конкурирующий ион продолжает переноситься через мембрану с достаточно высокой скоростью.

Целью проекта является исследование возможности практической осуществимости электро-баромембранного метода и выяснение его конкурентоспособности.

В ходе выполнения проекта были исследованы 16 мембран, включая ионообменные, трековые и нанофильтрационные мембраны отечественных (Щекиноазот; Объединенный институт ядерных исследований, Дубна; Владипор, Владимир) и зарубежных (Япония, Китай) производителей. Показано, что наиболее перспективными для реализации электро-баромембранного разделения ионов являются трековые и аналогичные им мембраны с пораами размером 20 – 100 нм, стенки которых имеют определенный заряд.

Полученные результаты показывают, что величины коэффициента селективности разделения катионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Li}^+$  и потока предпочтительно проницаемого иона находятся на уровне лучших мировых достижений. При этом энергозатраты на процесс разделения оказались беспрецедентно низкими. Так, при близких значениях потоков ионов, в нашем процессе энергозатраты примерно в 30 раз ниже, чем в аналогичном процессе разделения  $\text{Li}^+$  и  $\text{K}^+$ , описанном в недавней работе международной группы из University of Notre Dame, USA, Polytechnic University of Catalonia, Spain и National Academy of Sciences of Ukraine. Хотя электро-баромембранный метод разделения ионов (метод противоточной электромиграции) был предложен еще в 40-е годы, только в нашей работе впервые были достигнуты столь значимые показатели разделения. Данные результаты можно оценить как значительно превосходящие мировой уровень в области разделения одноименно заряженных ионов. Низкие энергозатраты обусловлены тем, что конвективный перенос

через мембрану размывает обедненный диффузионный слой, примыкающий к мембране, что снижает сопротивление системы по сравнению как с электро-, так и с баромембранными процессами. К этому можно добавить, что, как известно, разделение однозарядных ионов является существенно более сложной задачей по сравнению с разделением одно- и многозарядных ионов, где исследователи уже добились значительного прогресса как при использовании метода электродиализа, так и нанофильтрации.

Результаты, полученные при выполнении проекта, опубликованы в 7 статьях в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, в их числе 3 статьи в высокорейтинговом журнале *Journal of Membrane Science* (Q1, импакт-фактор 8.742), а также представлены на 9 крупных международных конференциях и всероссийских конференциях с международным участием. Получен патент РФ на изобретение способа разделения компонентов раствора; научная разработка способа электро-баромембранного извлечения ценных ионов из природных вод удостоена 3 золотых и 1 серебряной медалей на международных выставках, форумах и салонах изобретений.