

Мембраны на основе оксида графена для селективного транспорта воды

Гурьянов К.Е.¹, Лесных А.А.¹, Беломестных И.А.¹, Елисеев Ар.А.¹, Петухов Д.И.²,
Чумаков А.С.³, Елисеев Ан.А.¹

eliseev@inorg.chem.msu.ru

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² NYUAD Water Research Center, Abu Dhabi, United Arab Emirates

³ ESRF – The European Synchrotron, Grenoble, France

В работе показаны результаты экспериментального и теоретического исследований процессов массопереноса через наноканалы селективных слоев на основе наноллистов оксида графена а также других квазидвумерных соединений (слоистых карбидов и оксидов титана, CdTe, MoS₂). Исследованы особенности транспорта молекул воды, органических растворителей и надкритических газов в данных системах в зависимости от межплоскостного расстояния в слоистых мембранах. Показана возможность селективного выделения молекул воды из различных жидких, газовых и паровых смесей. С использованием композиционных мембран на основе наноллистов оксида графена показана возможность осушения газов с селективностью разделения в паре H₂O/N₂ $>3 \cdot 10^5$ и производительностью по молекулам воды до 250 нм³·м⁻²·бар⁻¹·ч⁻¹. Продемонстрирована высокая эффективность перапорационного опреснения с производительностью по молекулам воды до 15 кг·м⁻²·ч⁻¹ при степени отсека по катионам $>99,99\%$. Проиллюстрирована возможность коцентрирования и осушения водно-органических смесей. В процессе мембранной дистилляции азеотропной смеси H₂O/C₂H₅OH достигнуты показатели селективности >1500 при производительности по воде >5 нм³·м⁻²·бар⁻¹·ч⁻¹. Достигнута высокая селективность разделения катионов K⁺/Mg²⁺ (>300) в растворах хлоридов и производительностью по катионам K⁺ до $\sim 6 \cdot 10^{-3}$ моль·м⁻²·ч⁻¹. Представлен пример фотокаталитической нанофильтрации водно-органических смесей со степенью отсека органических компонентов на мембранах с селективными слоями на основе наноллистов MXene $>98\%$ при воздействии УФ облучения.

Для установления особенностей транспорта молекул воды и органических растворителей в наноканалах сформированных мембран проведены исследования межплоскостного расстояния методом дифракции синхротронного излучения в режимах *in situ* и *in operando*. Показано, что механизм и энергия активации массопереноса во многом определяется размером нанощели, обратимо изменяющейся в процессе сорбции/десорбции молекул пенетрантов, ионной силой контактирующих жидкостей, плотностью интеркалированной фазы и степенью функционализации поверхности наноллистов. Предложен новый метод исследования состава адсорбированной в межслоевом пространстве фазы с использованием метода *in situ* ИК-спектроскопии. Использование данных методов определены вклады сорбции и диффузии на транспортные характеристики мембран. Установлено, что высокая селективность разделения водно-органических смесей в процессе мембранной дистилляции в значительной степени определяется сорбционной селективностью оксида графена по отношению к молекулам воды. Экспериментальные данные дополнены результатами полуэмпирического моделирования структуры слоистых мембранных систем, расчетами энтальпии сорбции различных соединений и энергии активации транспорта. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность использования мембран на основе оксида графена и других квазидвумерных соединений для селективного транспорта молекул воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 23-13-00195-П.