

УДК 513.15

DOI: 10.17223/00213411/64/5/74

*В.А. ПОТЕРЯЕВА, М.А. БУБЕНЧИКОВ***РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ПОМОЩЬЮ ДВУХСЛОЙНЫХ МЕМБРАН ***

Описан процесс квантового просеивания через двухслойные мембраны, рассчитанный для изотопов водорода. Приведена технология получения потенциальной энергии взаимодействия моноатомной мембраны с атомами и молекулами. Получена плотность вероятности распределения молекул при прохождении через мембрану посредством решения дифференциального уравнения Шредингера методом «сшивки» решений на концах расчетного интервала. Рассмотрена проницаемость двухслойной мембраны графидина для изотопов водорода H_2 , D_2 , T_2 , HD . Найдены резонансные режимы прохождения компонент и определены условия, благоприятные для выделения отдельных компонент из смеси. В результате показано, что составные мембраны являются эффективным средством разделения изотопов, находящихся в газовом состоянии при криогенных температурах.

Ключевые слова: разделение газов, водород, дейтерий, тритий, пористый графен, графидин, составная мембрана, туннельный эффект, резонансное прохождение, уравнение Шредингера.

Введение

Водород, первый элемент химической системы, – самый распространенный элемент во Вселенной. Однако 99.98% этого количества приходится на протий (1H или H_2), в то время, как содержание дейтерия (2H или D_2), трития (3H или T_2), а также дейтерида водорода (H^2H или HD) в источниках крайне мало. Несмотря на это, дейтерий и тритий являются важными компонентами в некоторых технологических и промышленных производствах. Дейтерий применяется в атомной энергетике как лучший замедлитель нейтронов, в водородной спектроскопии ядерного магнитного резонанса используется в качестве изотопного индикатора. Тритий находит применение в военной промышленности и аналитической химии. Они оба используются в качестве сырья в термоядерных реакторах типа токамак.

Фактически выход изотопов водорода для ядерного сырья составляет менее 10%, поэтому их извлечение имеет решающее значение для сокращения ядерных отходов. Кроме того, выделение дейтерия из водорода может быть экономически выгодным, тогда как в случае трития ввиду его воздействия на окружающую среду желательно сделать эту операцию обязательным требованием.

Наличие эффекта туннелирования молекул, который заключается в существовании ненулевой вероятности прохождения через барьер частицы, энергия которой меньше высоты барьера, способствует разделению изотопов [1, 2], что невозможно в молекулярно-динамическом подходе [3, 4]. К сожалению, одиночный барьер не обеспечивает степени разделения, достаточной для промышленного применения, а сходные химические характеристики изотопов являются препятствием для квантового просеивания. Однако двойной барьер при криогенных температурах приводит к резонансному эффекту [5, 6], при котором разница в проницаемости мембраны даже для компонент, различающихся лишь массой, становится ощутимой. Расположенные на определенном расстоянии две моноатомные мембраны создают условия, благоприятные для прохождения одной компоненты и задерживающие другую. Основная задача синтеза таких материалов заключается в удержании требуемой дистанции между слоями мембраны [7, 8].

Для разделения изотопов хорошо зарекомендовали себя мембраны из пористого графена [9] и его аллотропов, а также графеноподобные материалы, такие, как нитрид углерода [10, 11], нитрид бора и другие вещества. Бездефектные слои новых 2D-материалов являются непроницаемыми для любых газов. Однако ещё на стадии синтеза таких материалов удалось получить новые сверхтонкие пленки в виде сетчатой структуры с регулярными порами. Наноразмерные поры оказались селективными в отношении разделения легких газов. Например, одним из недавно синтезированных многообещающих 2D-материалов является графидин [12–14]. Своеобразные треугольные равномерно распределенные поры образуются углеродными цепями, связывающими соседние бензольные кольца.

* Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-51-44002).

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>