

ГЕТЕРОФАЗНОЕ КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ОКСИДОВ ТРИТИЯ

Я.О. Шабловский

*Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Гомель, Белоруссия*

При переработке тритийсодержащих водных отходов можно получить тритиевый продукт высокой практической и товарной ценности. Для этого необходимо: 1) кондиционирование (предварительное обогащение) сырьевого водно-тритиевого раствора посредством обратного осмоса; 2) концентрирование оксида трития путём солевой ректификации тритиевой воды; 3) получение тритиевого льда. В работе определены физико-химические условия осуществления каждой из этих трёх технологических ступеней. Особое внимание уделено возможности получения изотопа ^3He (гелия-3).

Ключевые слова: *тритий, оксид прототрития, оксид дейтеротрития, прототритиевая вода, дейтеротритиевая вода, прототритиевый лёд, дейтеротритиевый лёд, гелий-3.*

Предмет нашего исследования – оксид прототрития НТО и оксид дейтеротрития DTO. Эти оксиды образуются, когда обычная либо тяжёлая вода используется в качестве теплоносителя и одновременно замедлителя ядерной реакции [1, 2]. В большинстве случаев побочным продуктом эксплуатации таких реакторов оказывается прототритиевая вода – раствор оксида прототрития в лёгкой воде; реже приходится иметь дело с дейтеротритиевой водой – раствором оксида дейтеротрития в тяжёлой воде [2].

По своей радиотоксичности тритиевая вода сравнима с изотопом ^{239}Pu , в связи с чем необходимо её обезвреживание. Пассивное обезвреживание – иммобилизация радионуклидов – считается малозатратным методом утилизации, но из-за проницаемости через конструкционные материалы тритий плохо поддается иммобилизации стандартными приёмами [3]. Это побуждает пересмотреть традиционный подход, нацеленный на создание композиционных материалов, обеспечивающих мезоструктурное связывание трития. Более продуктивным представляется внутримолекулярное связывание трития в супрамолекулярных гидрогелях. Во-первых, гидрогели способны связывать большое количество воды при относительно малых (~ 3 ммоль/л) концентрациях реагентов [4]. Во-вторых, гидрогели обычно образуются на основе аминокислот, которым, как известно [5], свойственно выраженное накопление трития в аминогруппах.

Предпочтительны супрамолекулярные гидрогели на основе L-цистеина [6], имеющего короткую углеводородную цепочку и содержащего наряду с аминогруппой тиольную и карбоксильную группы.

Нами изучена возможность активного обезвреживания тритийсодержащих водных отходов – их переработка с получением тритиевого продукта в виде твёрдого концентрата оксида трития.

В работе [7] подчёркивалось, что экономическая целесообразность такой переработки определяется технологией обогащения сырья – способом концентрирования трития (точнее, его оксида) в тритиевой воде. Классическое решение этой технологической задачи – каталитический изотопный обмен в системе "вода–водород" [8], но его чрезвычайная взрывоопасность вынуждает искать альтернативные решения. На современном этапе наиболее перспективным направлением считается усовершенствование мембранных технологий.

Для отделения радиоактивных изотопологов воды от её стабильных изотопологов, т.е. для разделения веществ с идентичным строением молекулы, фракционирующая мембрана должна иметь ультрамикроскопические (предпочтительно наноразмерные) цилиндрические поры с контролируемым углом наклона их оси к плоскости мембраны [9]. Этим требованиям удовлетворяют трековые мембраны, чаще всего изготавливаемые из полиэтилентерефталата [10]. Технология изготовления таких мембран и методология контроля их качества уже отработаны [10, 11]. Для дальнейшего продвижения в этом направлении применительно к обезвреживанию тритийсодержащих водных отходов необходимо определение оптимального режима их баромембранного кондиционирования (первичного концентрирования оксида трития), что и является одной из целей нашей работы. Помимо этого, в последующих разделах мы также выявим предпочтительные пути вторичного концентрирования оксидов трития, имея конечной целью получение их компактных концентратов с высокой практической и товарной ценностью.

Кондиционирование тритиевой воды

Высокая эффективность баромембранного концентрирования тритиевой воды была продемонстрирована в работе [12], в которой, однако, был сделан вывод, что достигаемый результат зависит только от свойств конкретной мембраны. Авторы [13], напротив, заострили внимание на том, что для обратного осмотического выделения оксида трития из тритиевой воды необходимо её охлаждение ниже 283 К. Определим условия баромембранного концентрирования тритиевой воды.

Общеизвестно, что охлаждение воды ниже температуры её максимальной плотности вызывает образование в воде льдоподобных молекулярных кластеров. С учётом этого верхней границей рабочих

температур баромембранной обработки прототритиевой воды служит температура $\hat{T}_{HT} \sim 280,6$ К, соответствующая максимальной плотности жидкого оксида НТО. В прототритиевой воде при температуре T немного ниже \hat{T}_{HT} кластеризации будут подвержены только молекулы НТО. Их тепловое движение окажется "скованным" по сравнению с движением молекул растворителя, и это различие тепловой подвижности молекул НТО и H_2O обеспечит возможность осмотического фракционирования трития. Если же температура прототритиевой воды опустится ниже $\hat{T}_H = 277,15$ К, т.е. ниже точки максимума плотности жидкого оксида протия, то произойдет кластеризация молекул H_2O и осмотическое фракционирование трития выродится. Таким образом, для концентрирования оксида НТО баромембранная обработка **прототритиевой воды** должна осуществляться при температуре

$$\hat{T}_H < T < \hat{T}_{HT}. (1)$$

Аналогичное ограничение необходимо соблюдать при концентрировании оксида DTO: баромембранная обработка **дейтеротритиевой воды** должна осуществляться при температуре

$$\hat{T}_D < T < \hat{T}_{DT}, (2)$$

где $\hat{T}_D = 284,3$ К – температура максимальной плотности жидкого D_2O , $\hat{T}_{DT} \sim 285,5$ К – температура максимальной плотности жидкого DTO.

Теперь обратимся к основному уравнению осмометрии [14]

$$\pi V_s = RT \ln \frac{p_s^\circ}{p_s}, (3)$$

где π – осмотическое давление, V_s – молярный объем растворителя, R – универсальная газовая постоянная, p_s° и p_s – давления его насыщенного пара над чистым растворителем и над раствором. Смесь жидких изотопологов является идеальным раствором, поэтому мы можем применить закон Рауля

$$\frac{p_s}{p_s^\circ} = x_s, (4)$$

где x_s – молярная доля растворителя в растворе. В рассматриваемом случае решающее значение имеет то обстоятельство, что молекулы растворенного оксида прототрития участвуют в формировании сетки водородных связей наравне с молекулами растворителя – оксида протия. В силу большей асимметрии зарядовой плотности молекул НТО образуемые ими водородные связи прочнее водородных связей между молекулами H_2O , из-за чего подвижность смежных с молекулами НТО молекул H_2O в прототритиевой воде снижена. Если такое снижение

подвижности затрагивает ξ молекул H_2O в пересчёте на одну молекулу НТО, то из общего числа N_H молекул H_2O в формировании пара растворителя могут участвовать только $N_H - \xi N_T$ молекул, где N_T – число молекул НТО. С учётом этого эффективная молярная доля растворителя составит

$$\frac{N_H - \xi N_T}{N_H + N_T} = 1 - x_T(1 + \xi), \quad (5)$$

где x_T – молярная доля оксида трития. Из (3) – (5) находим изотопное осмотическое давление тритиевой воды:

$$\pi_i = \frac{RT}{V_s} \ln[1 - x_T(1 + \xi)]. \quad (6)$$

Очевидно, что общее осмотическое давление тритиевой воды

$$\pi_\Sigma = \pi_i + \sum_{k=1}^n \pi_k,$$

где π_k – парциальное осмотическое давление k -го нетритиевого примесного компонента ($k = 1, 2, \dots, n$). Обозначим π_l низшее из парциальных давлений π_k . Тогда рабочее давление

$$\pi_i < p < \pi_i + \pi_l \quad (7)$$

обратного осмоса при температуре (1) либо (2) позволит получить концентрат оксида прототрития либо оксида дейтеротрития при одноступенчатой баромембранной обработке. Если количественный состав примесей неизвестен и применение критерия (7) невозможно, то баромембранную обработку тритиевой воды следует производить двухступенчато. А именно, вначале при температуре (1) либо (2) и давлении

$$\pi_i < p \ll \pi_\Sigma \quad (8)$$

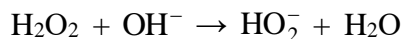
получают черновой осмотический концентрат оксида прототрития либо оксида дейтеротрития, который затем очищают от примесей путём баромембранной обработки при

$$\begin{cases} T > 283\text{K}, \\ p > \pi_\Sigma. \end{cases} \quad (9)$$

Давление π_Σ может многократно превышать "типичные" значения. Впервые это отметили авторы [15], исследовавшие водопроницаемость бентонитовых мембран и назвавшие обнаруженную гипербарическую аномалию изотопным осмосом. По нашему мнению, правильнее говорить о явлении радиолитического осмоса тритиевой воды, т.к. нетипично высокие значения её осмотического давления π_Σ обуславливаются не изотопией, а авторадиилизом.

В самом деле, известно [16], что в разбавленной тритиевой воде, а именно, при её активности менее 1 мКи/моль (1 г трития соответствует

9619 Ки) накапливаются продукты автордиолиза, не содержащие тритий. Первичные продукты автордиолиза тритиевой воды – радиолитические газы (H_2 и O_2) и пероксид водорода [17]. Последний взаимодействует с содержащимися в воде первичными примесями, что ведёт к образованию вторичных продуктов автордиолиза. При подщелачивании ($pH \geq 10$)



пероксид водорода нейтрализуется, а образующиеся гидропероксид-ионы HO_2^- , обладающие восстановительными свойствами, нивелируют окислительные процессы в радиолитической водной системе. За счёт этого при подщелачивании подавляется образование вторичных примесей, что упрощает баромембранную обработку тритиевой воды. В отсутствие подщелачивания концентрация вторичных примесей (включая радиолитический пероксид водорода) в тритиевой воде может оказаться намного больше концентрации первичных примесей, что обусловит соразмерно большое осмотическое давление тритиевой воды, растущее с течением времени.

Получение концентрированной тритиевой воды

Концентрирование тяжёлых изотопологов воды обычно производят путём их парофазного выделения [18]. Этот процесс сопряжён с разрушением сетки водородных связей, благодаря чему изотопную селективность при концентрировании тяжёлых изотопологов воды можно усилить за счёт положительной гидратации.

В самом деле, ионы с положительной гидратацией связывают молекулы воды, затрудняя её самодиффузию и тем самым усиливая различия между изотопологами воды в их смеси. В наибольшей степени упомянутое связывание молекул свойственно аниону F^- , способному участвовать в образовании водородных связей. В свете сказанного ясно, что коэффициент изотопного разделения существенно повысится, если в разделяемой смеси изотопологов воды предварительно растворить фторид цезия CsF или фторид рубидия RbF либо иную незначительно гидролизующуюся соль с большой растворимостью при условии, что у этой соли положительна сумма энергий ближней (первичной) гидратации её ионов. При отрицательности такой суммы отрицательным окажется и изотопный солевой эффект: селективность разделения изотопологов воды в этом случае понизится.*) Если речь идёт о крупнотоннажной переработке тритиевой воды, то целесообразно использовать сульфаты и фосфаты, у которых достаточно высокая положительная гидратация сочетается с значительно меньшей, нежели у фторидов, стоимостью и

*) С описанным отрицательным эффектом столкнулись авторы [18].

токсичностью. Предпочтительны ортофосфат натрия Na_3PO_4 и сульфат магния MgSO_4 . Обоснуем этот выбор.

При разделении изотопов обычно руководствуются тем, что более тяжёлый изотоп накапливается в более плотной фазе. При разделении изотопологов, т.е. веществ с идентичным строением молекулы, накоплению более тяжёлой изотопной фракции будет способствовать не только бóльшая плотность фазы, но и бóльшая выраженность её мезоструктурной регулярности – основной фактор подавления подвижности структурных единиц в конденсированном состоянии. Из-за различий в таком подавлении в тех случаях, когда в смеси изотопологов образуется новая фаза, более тяжёлый (т.е. более диффузионно-инерционный) изотополог будет предпочтительно концентрироваться в той фазе, формирование которой сопряжено с меньшей структурной перестройкой при трансформации данной смеси. Речь идёт о противопоставлении альтернативных путей структурной перестройки при фазообразующих процессах с участием изотопологов, и сказанное относится как к агрегатному, так и к реконструктивному фазообразованию.

Для нашего рассмотрения интерес представляет такое проявление изотопной селективности при реконструктивном фазообразовании как разбавление тяжёлых изотопологов в кристаллизационной воде. Исследовательская группа Н. Танака с соавт. обнаружила, что по сравнению с водным раствором, в котором образуется кристаллогидрат, вода гидратных оболочек обеднена тритием [19], [20]. Следовательно, если безводный гидратообразователь растворять в прототритиевой воде, доводя раствор до насыщения, а затем охлаждать этот раствор, то концентрация оксида трития в нём будет повышаться, т.к. снятие пересыщения будет происходить за счёт преимущественного осаждения кристаллогидрата с протиевой водой.

Доля химически связанной воды наиболее высока у ортофосфата натрия, образующего додекагидрат $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Однако этот кристаллогидрат отличается высокой термической устойчивостью и его сложно рециклировать. С точки зрения возможности многократного рециклирования предпочтителен сульфат магния: общеизвестно, что его гептагидрат $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (эпсомит) легко дегидратируется при нагревании до температуры $\sim 210^\circ\text{C}$.

Получение тритиевого льда

Для финального концентрирования тритиевой воды, а именно, для получения компактного концентрата оксида трития, целесообразно привести пар тритиевой воды в химическое взаимодействие с безводным перхлоратом магния $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$, термостатированным при температуре ниже точки плавления концентрируемого оксида трития.

Температура плавления оксида прототрития (275,55 К) заметно превышает температуру плавления лёгкой воды (273,15 К). При взаимодействии пара прототритиевой воды с безводным перхлоратом магния, термостатированным при температуре 273,5 – 275 К, оксид протия вступит в реакцию с образованием кристаллогидратов $Mg(ClO_4)_2 \cdot nH_2O$, где $n = 2, 4$ либо 6 , а оксид прототрития кристаллизуется, образуя прототритиевый лёд.

Аналогично можно получить дейтеротритиевый лёд. Для этого, учитывая малое различие температур плавления оксида дейтеротрития (277,33 К) и тяжёлой воды (276,96 К), пар дейтеротритиевой воды необходимо привести в химическое взаимодействие с безводным перхлоратом магния, термостатированным при температуре $277,15 \pm 0,05$ К.

Предпочтительно использовать насыщенный пар тритиевой воды. Для давления \hat{p}_{HT} насыщенного пара оксида прототрития выполненная нами обработка экспериментальных данных [21] дала эмпирические равенства

$$\frac{\hat{p}_{HT}(T)}{\hat{p}_H(T)} = 1,766 \exp(-196,129 T^{-1}), \quad T < 273,15 \text{ К};$$

$$\frac{\hat{p}_{HT}(T)}{\hat{p}_H(T)} = 1,330 \exp(-112,736 T^{-1}), \quad T > 273,15 \text{ К},$$

где давление \hat{p}_H насыщенного пара оксида протия использовано в качестве реперного. Давление \hat{p}_{DT} насыщенного пара оксида дейтеротрития до настоящего времени не измерялось. Постулировав термодинамическое подобие свойств в ряду $D_2O - DTO - T_2O$, можно получить соотношение

$$\hat{p}_{DT} = 0,6\hat{p}_D + 0,4\hat{p}_T, \quad (10)$$

где \hat{p}_D – давление насыщенного пара D_2O , \hat{p}_T – давление насыщенного пара T_2O . Результаты расчёта по формуле (10) с использованием экспериментальных данных [22] представлены на рисунке 1.

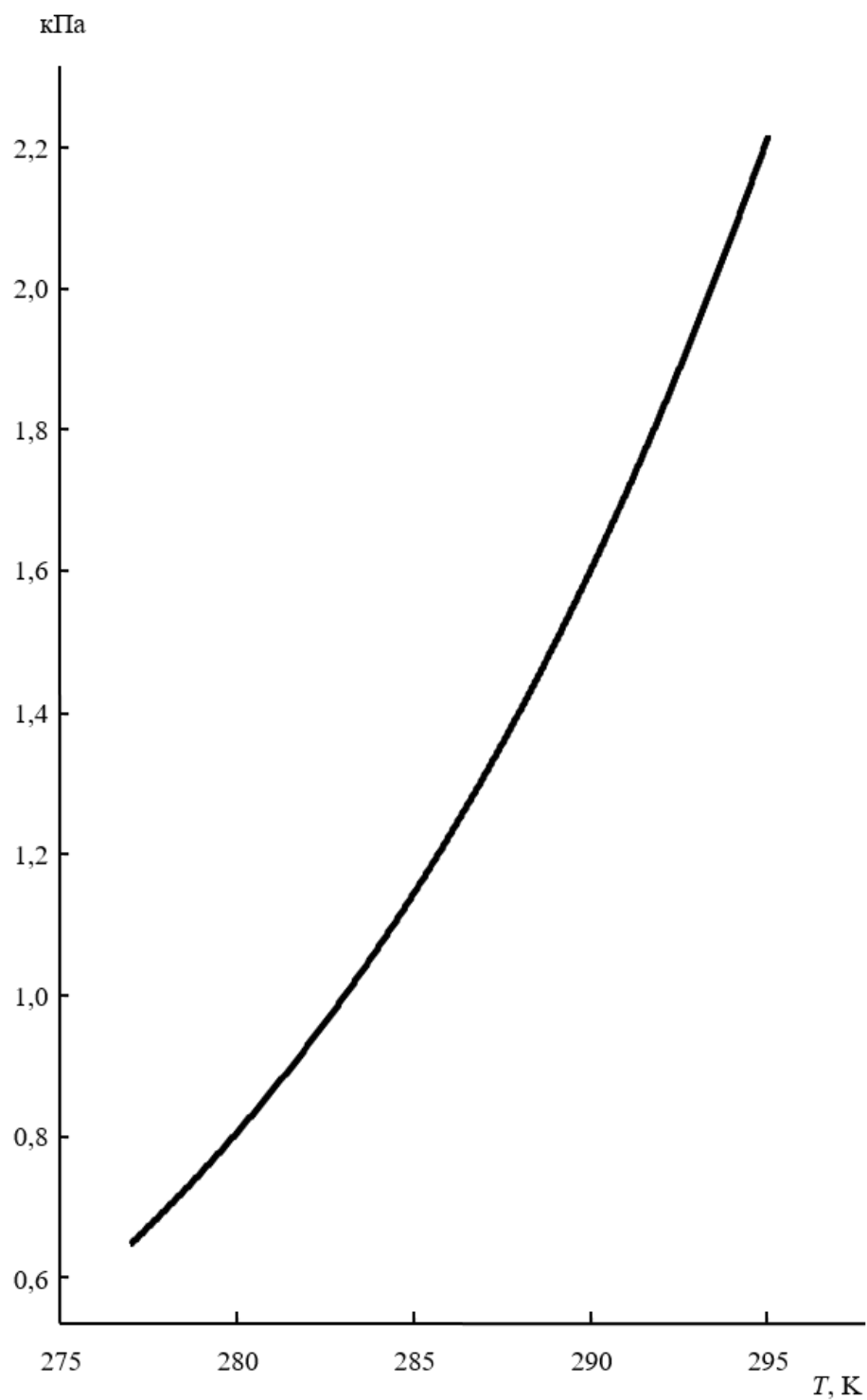
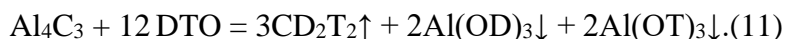


Рис. 1. Давление насыщенного пара оксида дейтеротрития DTO

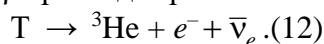
Насыщенный влагой перхлорат магния регенерируют в вакууме при остаточном давлении ниже 0,1 Торр и температуре 205 ÷ 250°C [23, с. 176]. Применительно к нашему случаю эти технические затраты оправданы, т.к. использование перхлората магния вышеизложенным способом позволит получать компактные концентраты оксидов трития – изотопологи тритиевого льда.

Дейтеротритиевый лёд способен служить прекурсором для получения дейтеротритиевого метана CD₂T₂ гидролизом карбида алюминия:



Наш расчёт показал, что при стандартных условиях реакция (11) будет протекать самопроизвольно ($-\Delta_r G \sim 1785$ кДж/моль) и притом в экзотермическом режиме ($-\Delta_r H \sim 1817$ кДж/моль). Возможность осуществления реакции (11) имеет особое практическое значение ввиду того, что дейтеротритиевый метан на современном этапе рассматривается в качестве наиболее перспективного рабочего вещества для проведения управляемой термоядерной реакции (подробнее об этой перспективе см. [24]).

Получение прототритиевого льда позволит существенно нарастить производство изотопа ³He (гелия-3). Естественные сырьевые источники гелия-3 настолько скудны [25], что его получение в промышленных объёмах возможно только путём накопления газообразного продукта β⁻-распада трития



Процесс (12) сопутствует хранению любого соединения трития. Тем не менее, обычно в качестве прекурсора радиогенного гелия-3 используют молекулярный тритий [26], что чрезвычайно высокзатратно как с технической, так и с экономической точки зрения. Более предпочтительным прекурсором радиогенного гелия-3 представляется прототритиевый лёд.

Во-первых, получить прототритиевый лёд весьма просто (см. выше) и притом заведомо проще, нежели любой иной прекурсор гелия-3. Во-вторых, сырьё для получения прототритиевого льда – водные отходы эксплуатации ядерных реакторов – не только имеются в избытке, но и требуют обезвреживания. Получение гелия-3 при их переработке обеспечит её рентабельность даже при сверхнизком содержании в них трития. В-третьих, прототритиевый лёд химически малоактивен и его длительное хранение с целью накопления продукта β⁻-распада (12) не связано с какими-либо техническими затруднениями. При этом продуктивность процесса (12) легко оценить, исходя из того, что у трития период полураспада $\tau_{1/2} = 12,32$ лет. Для конкретного иллюстративного примера возьмём в качестве исходных данных условия проведения опыта

в классической работе [27]. Тогда удельная производительность хранения тритиевого концентрата с начальной удельной активностью 1850 Ки за 56 дней составит 0,43 ммоль гелия-3.

Заключение

Переработка тритийсодержащих водных отходов позволит получать тритиевый продукт высокой практической и товарной ценности. Для этого необходимо: 1) кондиционирование (предварительное обогащение) сырьевого водно-тритиевого раствора посредством обратного осмоса; 2) концентрирование оксида трития путём солевой ректификации тритиевой воды; 3) получение тритиевого льда.

Оптимальный способ предварительного обогащения водно-тритиевых растворов – использование обратноосмотических мембран. Режим баромембранной обработки тритиевой воды определяется соотношениями (1), (2), (6) – (9). При подщелачивании ($\text{pH} \geq 10$) эффективность баромембранной обработки тритиевой **воды** повысится.

Для получения концентрированной тритиевой воды предпочтительна солевая ректификация, изотопную селективность которой можно усилить за счёт положительной гидратации. Коэффициент изотопного разделения существенно увеличится, если в разделяемой смеси изотопологов воды предварительно растворить незначительно гидролизующуюся соль с высокой растворимостью при условии, что у этой соли положительна сумма энергий ближней (первичной) гидратации её ионов. При крупнотоннажной переработке тритиевой воды в качестве солевых агентов целесообразно использовать сульфаты и фосфаты. Важный фактор выбора солевого агента для ректификации тритиевой воды – способность к гидратообразованию. Если безводный гидратообразователь растворять в прототритиевой воде, доводя раствор до насыщения, а затем охлаждать этот раствор, то концентрация оксида трития в нём будет повышаться, т.к. снятие пересыщения будет происходить за счёт преимущественного осаждения кристаллогидрата с тритиевой водой. Наиболее предпочтительные солевые агенты для ректификации больших объёмов тритиевой воды – ортофосфат натрия Na_3PO_4 и сульфат магния MgSO_4 .

Для получения компактного концентрата оксида трития (тритиевого льда) следует привести пар тритиевой воды в химическое взаимодействие с безводным перхлоратом магния $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$, термостатированным при температуре ниже точки плавления концентрируемого оксида трития. Особый практический интерес представляет прототритиевый лёд, получение которого позволит существенно увеличить объёмы производства изотопа ^3He (гелия-3).

Список литературы

1. Беловодский Л. Ф., Гаевой В. К., Гришмановский В. И. Тритий. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 247 с.
2. Перевезенцев А.Н., Розенкевич М.Б. Технология трития для термоядерного реактора. – Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2019. – 336 с.
3. Магомедбеков Э.П., Растунова И.Л. Обращение с тритийсодержащими водными отходами // Химическая промышленность. 2019. № 3. С. 62–68.
4. Пахомов П.М., Хижняк С.Д., Овчинников М.М., Комаров П.В. Супрамолекулярные гели. Тверь: ТвГУ, 2011. 270 с.
5. Кондакова Ю.В., Шестаков И.А., Сазонов А.Б. Термодинамические изотопные эффекты трития в амидах и аминокислотах // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31, № 10. С. 34–36.
6. Баранова О.А., Хижняк С.Д., Пахомов П.М. Супрамолекулярный гидрогель на основе L-цистеина и наночастиц серебра // Журнал структурной химии. 2014. Т. 55. № 1. С. 176–180.
7. Магомедбеков Э. П., Растунова И. Л. Проблемы детритизации водных радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 2 (19). С. 17–24.
8. Андреев Б.М., Магомедбеков Э.П., Розенкевич М.Б., Сахаровский Ю.А. Гетерогенные реакции изотопного обмена трития. Под общ. ред. Б. Ф. Мясоедова. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 206 с.
9. Sun D., Run L. Hydrogen isotopic water separation in membrane distillation // Separation and Purification Technology. 2023. Vol. 314, № 1. P. 123634-1– 123634-19.
10. Пахомов П.М., Маланин М.Н., Круглова Е.В., Хижняк С.Д. Трековые мембраны из полиэтилентерефталата // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2001. Т. 43. № 4. С.764–768.
11. Пахомов П.М., Круглова Е.В., Хижняк С.Д. Изучение пористости полимеров методом ИК-спектроскопии // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 2000. Т. 42, № 6. С. 1081–1088.
12. Prabhakar S., Misra V. M., Ramami M. P. S. Relative transport of water (H₂O) and tritiated water (HTO) across cellulose acetate membranes // Radiochimica Acta. 1986. Vol. 39, № 2. P. 93–96.
13. Nelson D. A., Duncan J. B., Jensen G. A., Burton S. D. Isotopomeric water separations with supported polyphosphazene membranes // Journal of Membrane Science. 1996. Vol. 112, № 2. P. 105–113.
14. Lott P. F., Millich F. Instrumentation for osmometry // Journal of Chemical Education. 1966. Vol. 43, № 3. P. A191–A208.
15. Соботович Э.В., Пушкарёв А.В., Литовченко А.С., Пушкарёва Р.А., Долин В.В. Феномен изотопного осмоса при использовании бентонитовых мембран // Доклады НАН Украины. 2007. № 1. С. 179–183.
16. Сазонов А. Б. Радиационно-индуцированные реакции трития: кинетика и механизмы реакций // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2013. Т. 36, № 2. С. 25–50.

17. Бугаенко, В. Л. Количественная модель радиолиза жидкой воды и разбавленных водных растворов: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.09 – М.: НИФХИ, 1992. – 232 с.
18. Кулов Н.Н., Полковниченко А.В., Лупачев Е.В., Вошкин А.А., Магомедбеков Э.П. Распределение изотопов водорода между фазами при парожидкостном равновесии водных солевых растворов // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54, № 1. С. 3–9.
19. Tanaka, H., Negita H. The fractionation of tritium in the crystallization of inorganic hydrates from a tritiated solution // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1970. Vol. 43, № 10. P. 3079–3082.
20. Tanaka, H., Kado T., Negita H. The fractionation of tritiated water in an equilibrium between organic hydrates and their aqueous solutions / H. Tanaka, T. Kado, H. Negita // Bulletin of the Chemical Society of Japan. 1974. Vol. 47, № 2. P. 278–280.
21. Baumgärtner F., Kim M.-A. Isotope effects in the equilibrium and non-equilibrium vaporization of tritiated water and ice // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. 1990. Vol. 41, № 4. P. 395–399.
22. Matsunaga N., Nagashima A. Saturation vapor pressure and critical constants of H₂O, D₂O, T₂O, and their isotopic mixtures / N. Matsunaga, A. Nagashima // International Journal of Thermophysics. 1987. Vol. 8, № 6. P. 681–694.
23. Шумахер И. Перхлораты: свойства, производство и применение. – М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1963. – 276 с.
24. Liu J., Wang Z.X., Chen C., Lei Y.A. Diamond DT methane impact fusion // Nuclear Fusion. 2009. Vol. 49. P. 065021-1–065021-5.
25. Бондаренко В.Л., Графов А.П. Оценка затрат на получение изотопа ³He из природного гелия криогенными методами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2012. Спец. выпуск № 8: "Холодильная и криогенная техника". С. 54–61.
26. Shea D. A., Morgan D. The Helium-3 shortage: supply, demand, and options // Congressional Research Service Report for Congress № 7-5700/R41419, December 22, 2010. – 27 p.
27. Heinze, S., Stolz T., Ducret D., Colson J.-C. Self-radiolysis of tritiated water: experimental study // Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 48, № 1. P. 673–679.

Об авторах:

ШАБЛОВСКИЙ Ярослав Олегович – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского сектора Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого (246029, г. Гомель, пр-т Октября, д. 48); e-mail: ya.shablowsky@yandex.ru.

HETEROPHASIC CONCENTRATING TRITIUM OXIDES

Ya.O. Shablovsky

Gomel State Technical University, Gomel

Recycling tritiated wastewater allows to obtain a tritium product of high practical and monetary value. The recycling process should include three stages: 1) conditioning (preliminary enriching) a raw tritiated water by means of reverse osmosis; 2) concentrating the tritium oxide by means of salt rectification of tritiated water; 3) obtaining the tritiated ice. The paper presents technological conditions for each stage with special attention paid to the opportunity of producing helium-3 as the final product of tritiated wastewater recycling.

Keywords: *tritium, prototritium oxide, deuterotritium oxide, prototritium water, deuterotritium water, prototritium ice, deuterotritium ice, helium-3.*

Дата поступления в редакцию: 10.01.2024.

Дата принятия в печать: 01.02.2024.