

13

## Демонстрация возможности селективной откачки D/T-смеси в установках управляемого термоядерного синтеза с помощью сверхпроницаемых мембран

© Е.Ю. Передистов, А.О. Буснюк, В.Н. Алимов, С.Р. Кузенов, А.И. Лившиц

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,  
Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: peredistov.eu@sut.ru

Поступило в Редакцию 29 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 2 ноября 2023 г.

Принято к публикации 2 ноября 2023 г.

Реализуемость предложения по селективной откачке D/T-смеси в установках управляемого термоядерного синтеза с помощью сверхпроницаемых мембран проверена в эксперименте с прямонакальной ниобиевой мембраной площадью  $0.06 \text{ m}^2$ , сопряженной с накаливаемыми танталовыми лентами, диссоциирующими молекулы  $\text{H}_2$ . Входная поверхность мембраны покрыта пленкой S. Исследования проведены в диапазоне давлений  $\text{H}_2$   $6 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ . Продемонстрирована откачка со скоростью  $440 \text{ l/s}$  при степени компрессии 390. Плотность проникающего потока достигает  $\sim 10^{21} \text{ H}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$  при полном потоке  $\sim 6 \cdot 10^{19} \text{ H}_2 / \text{s}$ . Компрессия до нормального давления достигается комбинацией сверхпроницаемых мембран с форвакуумным насосом без промежуточных ступеней.

**Ключевые слова:** сверхпроницаемая мембрана, термоядерный реактор, D/T-смесь, селективная откачка, атомы водорода.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.02.56984.19749

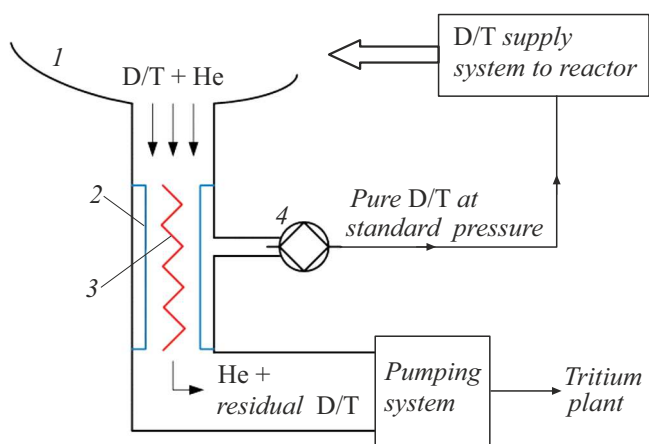
Ввиду того что концентрация He в рабочей плазме термоядерных реакторов (ТЯР) не должна превышать 5%, газовая смесь, содержащая  $\sim 95\%$  D/T, должна непрерывно выводиться из рабочей плазмы через дивертор и очищаться от He. Решением этой задачи для пост-ИТЭРовских установок управляемого термоядерного синтеза служит селективная откачка большей части D/T-смеси в непосредственной близости от дивертора и ее возвращение в рабочую плазму кратчайшим путем, минуя тритиевый завод [1–3]. Предлагается осуществить это с помощью металлических мембран, сверхпроницаемых по отношению к надтепловым водородным частицам, энергия которых составляет величину порядка  $1 \text{ eV}$  или более [1–4]. Такими надтепловыми частицами являются, в частности, тепловые атомы водорода, обладающие избытком химической энергии ( $2.2 \text{ eV}$ ) [1,3,5,6]. Сверхпроницаемые мембраны (СПМ) пропускают надтепловые водородные частицы с вероятностью, сравнимой с единицей за одно столкновение с поверхностью, автоматически сжимают проникающий водород и являются абсолютно непроницаемыми для других газов, включая He [5].

Предлагается [1–3] установить СПМ в сочетании с генератором надтеплого водорода вдоль стенок откачного тракта ТЯР в непосредственной близости от дивертора (рис. 1). В качестве генератора надтеплого водорода рассматривается либо холодная водородная плазма [1–4,7–9], либо нагретая металлическая поверхность (атомизатор) [1,3,6]. Для доказательства осуществимости такой концепции необходимо провести

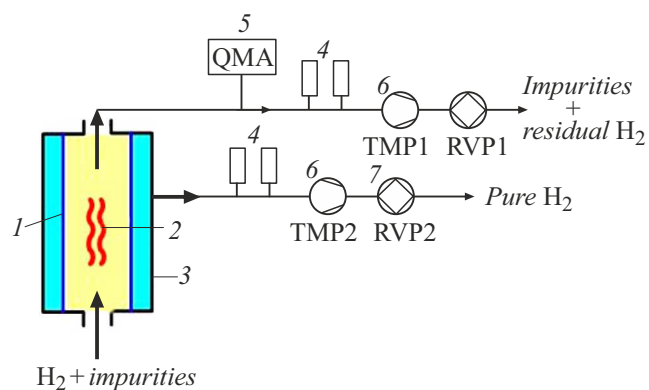
модельные эксперименты технически значимого масштаба [1–3], демонстрирующие достижение требуемых плотности потока откачиваемого водорода масштаба  $10^{16} - 10^{17} \text{ molecules}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  [1–4] и удельной скорости откачки масштаба  $11/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  в диапазоне давлений  $10^{-4} - 10^{-2} \text{ Torr}$  [1–3], а также компрессии откачиваемого водорода до нормального давления [1,2].

Мы полагаем, что достижение указанных параметров в первую очередь следует продемонстрировать с чистым протием (H). Основываясь на ранее полученных данных [6], мы не ожидаем, что изотопические эффекты (D, T) и присутствие He могут существенно изменить полученные результаты.

Эксперимент проводился на установке СУПМЕМ-1 (рис. 2), моделирующей схему, представленную на рис. 1. Вакуумная камера СУПМЕМ-1 моделирует откачной тракт ТЯР, показанный на рис. 1. Вдоль стенок вакуумной камеры расположена цилиндрическая (в форме тонкостенной трубы) СПМ, сопряженная с атомизатором так, как схематически показано на рис. 1. Цилиндрическая СПМ сделана из ниобия, который наряду с другими металлами пятой группы (V, Ta) является наиболее подходящим для СПМ материалом [5]. Площадь мембраны составляет  $0.06 \text{ m}^2$ , толщина  $0.1 \text{ mm}$ . СПМ может нагреваться до любой температуры (вплоть до расплавления) благодаря омическому (прямонакальному) нагреву. Атомизатор представляет собой две прямонакальные свободно висящие танталовые ленты, их полная площадь составляет  $80 \text{ cm}^2$ .



**Рис. 1.** Концептуальная схема селективной откачки смеси D/T из ТЯР с помощью СПМ. 1 — ТЯР, 2 — СПМ, 3 — атомизатор, 4 — форвакуумный насос.



**Рис. 2.** Схема установки СУПМЕМ-1. 1 — ниобиевая прямонакальная СПМ, 2 — танталовые ленты (атомизатор), 3 — водоохлаждаемая вакуумная камера, 4 — датчики давления, 5 — квадрупольный газоанализатор, 6 — турбомолекулярные насосы, 7 — форвакуумные насосы. Входной и выходной объемы выделены желтым и голубым цветом соответственно. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

СПМ разделяет две вакуумные камеры (рис. 2): входную, куда поступает поток  $H_2$  и где расположен атомизатор, и выходную, куда выделяется проходящий через СПМ водород. Турбомолекулярный насос (ТМН), присутствующий в системе откачки выходного объема (рис. 2), в штатном режиме работы выключается, и таким образом выходная сторона СПМ в соответствии с концептуальной схемой (рис. 1) откачивается напрямую форвакуумным насосом (без каких-либо промежуточных ступеней типа ртутного насоса [2]). Входной объем непрерывно откачивается ТМН, который моделирует систему откачки He и остаточного D/T (рис. 1).

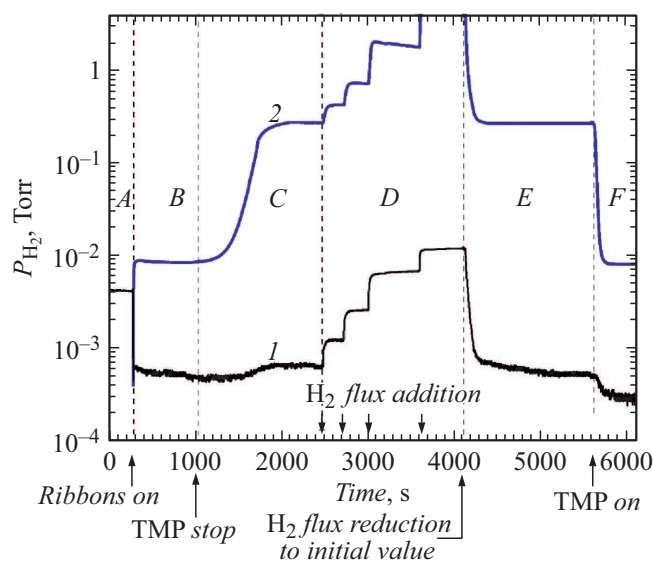
Для того чтобы обеспечить требуемые параметры, на входной поверхности СПМ необходимо создать достаточно высокий и плотный энергетический барьер, тор-

мозящий ассоциативную десорбцию абсорбированных атомов и диссоциативную абсорбцию газовых молекул водорода, но не препятствующий свободной абсорбции атомов H, находящихся в газовой фазе [5]. Для этой цели имеется возможность *in situ* модификации химического состояния поверхностей СПМ. Эта возможность реализуется благодаря 1) омическому нагреву СПМ, позволяющему варьировать температуру СПМ вплоть до точки плавления, оставляя при этом холодными водоохлаждаемые стенки вакуумной камеры; 2) контролируемому изменению среды, в которой находится СПМ.

В данном эксперименте перед началом работы СПМ прогревалась в сверхвысоком вакууме при 1250–1280 K в течение  $\sim 3$  h, затем на входную поверхность была осаждена сера в количестве, соответствующем  $\sim 15$  монослоям. Осаждение S производилось путем пиролиза  $H_2S$  при температуре СПМ 1000 K и контролировалось с помощью квадрупольного газоанализатора (рис. 2). Выбор S в качестве элемента, отвечающего за барьер, основан на известных представлениях о сере как о чрезвычайно сильном каталитическом яде, тормозящем в том числе рекомбинативную (в виде  $H_2$ ) реэмиссию абсорбированных в металле атомов H и таким образом способствующем осуществлению режима сверхпроницаемости [5].

Результаты эксперимента демонстрируются на рис. 3. В исходном состоянии (интервал A) атомизатор выключен, входной объем откачивается ТМН со скоростью 70 l/s и в него поступает поток водорода, который создает давление  $4 \cdot 10^{-3}$  Torr (измеряется баратроном). Выходной объем откачивается ТМН со скоростью 30 l/s, в нем глубокий вакуум.

Далее (интервал B) танталовые ленты атомизатора нагреваются до 2075–2085 K, происходит диссоциация



**Рис. 3.** Наблюдаемая картина изменения давлений на входе (1) и выходе (2) СПМ. В интервале B–F температура СПМ составляет  $\sim 970$  K (результат нагрева излучением атомизатора).

$H_2$  и образовавшиеся атомы  $H$  проникают сквозь СПМ. Это приводит к падению давления во входном объеме до  $4.9 \cdot 10^{-4}$  Торр и росту давления в выходном объеме до  $7.9 \cdot 10^{-3}$  Торр (измеряется датчиком Пирани). Из этого следует, что скорость откачки СПМ составляет 480 l/s ( $0.81/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ) при степени компрессии 16. Если считать, что вероятность диссоциации молекулы  $H_2$  на поверхности танталовых лент равна 0.25 (максимальное значение для атомарно-чистой поверхности [6]), объемная скорость диссоциации  $H_2$  лентами атомизатора площадью  $80 \text{ cm}^2$  не превышает 880 l/s. Таким образом, несмотря на неизбежные рекомбинационные потери в торцах цилиндрической СПМ, сквозь нее проникает более половины (480 l/s) диссоциированного водорода. Это означает, что атомы  $H$  эффективно абсорбируются через поверхность, покрытую  $S$ , и что благодаря создаваемому пленкой  $S$  барьеру термической реэмиссии большая их часть проникает через СПМ.

Далее (интервал  $C$ ) выходной ТМН выключается, и выход СПМ напрямую откачивается форвакуумным насосом (ротационного типа с масляной ловушкой). Это возможно благодаря тому, что непрерывный поток водорода в вязкостном режиме блокирует доступ к СПМ каких-либо газов со стороны форвакуумного насоса и выходная поверхность СПМ оказывается в благоприятной среде сверхчистого водорода. При том что выходное давление резко возрастает и степень компрессии достигает  $\sim 390$ , входное давление увеличивается лишь немного и скорость откачки СПМ с покрытой пленкой  $S$  входной поверхностью остается высокой (440 l/s). При этом СПМ откачивает поток  $H_2 \sim 0.3 \text{ sccs}$  (standard cubic centimetres per second) при давлении  $6.4 \cdot 10^{-4}$  Торр.

Далее (интервал  $D$ ) входной поток водорода пошагово увеличивается, и в момент  $t = 3100 \text{ s}$  поток, откачиваемый СПМ, составляет  $\sim 2.1 \text{ sccs}$  или  $\sim 5.7 \cdot 10^{19} H_2/s$ . При площади СПМ  $0.06 \text{ m}^2$  это соответствует плотности проникающего через СПМ потока  $0.94 \cdot 10^{17} H_2/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  при давлении  $6.4 \cdot 10^{-3}$  Торр. Таким образом, СПМ с покрытой пленкой  $S$  входной поверхностью обеспечивает плотность потока требуемого масштаба в релевантном диапазоне давлений. При дальнейшем увеличении потока ( $t = 3700 \text{ s}$ ) откачка СПМ продолжается и плотность проникающего потока еще возрастает, однако выходное давление выходит за рамки корректности измерений датчиком Пирани.

Далее (интервал  $E$ ) поток водорода во входной объем снижается до начального уровня, и затем (интервал  $F$ ) включается выходной ТМН. При этом выходное и входное давления возвращаются к наблюдавшимся ранее значениям (интервалы  $C$  и  $B$ ), что демонстрирует стабильную работу СПМ:

1) в условиях, когда ее входная сторона, покрытая монослойной пленкой  $S$ , взаимодействует с атомарным водородом (мы полагаем, что при температуре пиролиза  $H_2S$  осаждаемая на поверхность ниобия сера растворяется в объеме металла и лишь чрезвычайно

химически и термически стойкий монослой  $S$  остается на поверхности [5]);

2) при откачке выходной стороны СПМ форвакуумным насосом, который обеспечивает требуемую для работы СПМ чистоту благодаря потоку сверхчистого водорода, проникающего сквозь СПМ и блокирующего поступление любых газов со стороны форвакуумного насоса.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках договора с частным учреждением „Наука и инновации“ „ЕОТП-УТП-225“ (в части создания экспериментальной установки и проведения исследований) и научной программы Национального центра физики и математики (НЦФМ) „Физика изотопов водорода. Этап 2023–2025“ (шифр „НЦФМ-8-2325“) (в части осаднения  $S$ ).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.Н. Алимов, А.О. Буснюк, С.Р. Кузенов, Е.Ю. Передистов, А.И. Лившиц, в сб. *Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами*, под ред. А.А. Юхимчука (РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров, 2023), с. 10–37. DOI: 10.53403/9785951505378\_2023\_10
- [2] C. Day, B. Butler, T. Giegerich, P.T. Lang, R. Lawless, B. Meszaros, *Fusion Eng. Des.*, **109-111** (Pt A), 299 (2016). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.03.008
- [3] Д.А. Карпов, А.Г. Иванов, А.И. Лившиц, А.Н. Драничников, *Физика плазмы*, **47** (12), 1152 (2021). DOI: 10.31857/S0367292121120027 [D.A. Karpov, A.G. Ivanov, A.I. Livshits, A.N. Dranichnikov, *Plasma Phys. Rep.*, **47**, 1267 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21120023].
- [4] C. Li, A.J. Job, T.F. Fuerst, M. Shimada, J.D. Way, C.A. Wolden, *J. Nucl. Mater.*, **582**, 154484 (2023). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2023.154484
- [5] A.I. Livshits, M.E. Notkin, A.A. Samartsev, *J. Nucl. Mater.*, **170**, 74 (1990). DOI: 10.1016/0022-3115(90)90329-L
- [6] R.K. Musyaev, A.A. Yukhimchuk, B.S. Lebedev, A.O. Busnyuk, M.E. Notkin, A.A. Samartsev, A.I. Livshits, *Fusion Sci. Technol.*, **54**, 523 (2008). DOI: 10.13182/FST08-A1868
- [7] D.I. Cherkez, A.V. Spitsyn, A.V. Golubeva, V.M. Chernov, *Nucl. Mater. Energy*, **23**, 100756 (2020). DOI: 10.1016/j.nme.2020.100756
- [8] L. Wang, H.-S. Zhou, H.-D. Liu, Y.-P. Xu, Q. Qi, G.-N. Luo, *Fusion Eng. Des.*, **172**, 112755 (2021). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112755
- [9] H.-D. Liu, H.-S. Zhou, G.-N. Luo, P.-F. Zheng, *J. Nucl. Mater.*, **554**, 153071 (2021). DOI: 10.1016/j.jnucmat.2021.153071