

УДК 577.352.4

## Исследование явления сверхпроницаемости изотопов водорода через ванадиевую мембрану на установке "Прометей"

Р. К. Мусяев<sup>1</sup>, Б. С. Лебедев<sup>1</sup>,  
А. А. Юхимчук<sup>1</sup>, А. О. Буснюк<sup>2</sup>,  
А. А. Самарцев<sup>2</sup>, М. Е. Ноткин<sup>2</sup>,  
А. И. Лившиц<sup>2</sup>

*С целью развития технологии селективной мембранной откачки изотопов водорода для ее использования в реакторах УТС в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке "Прометей" были продолжены эксперименты по исследованию явления сверхпроницаемости при взаимодействии водородных частиц с металлическими мембранами при давлениях  $10^{-7}$ – $10^{-4}$  мбар.*

*Представлены результаты экспериментов по сверхпроницаемости тепловых атомов изотопов водорода, включая тритий, через ванадиевую цилиндрическую мембрану. Продемонстрирована возможность эффективной откачки, компрессии и рекуперации изотопов водорода. Даны оценки удельной скорости откачки и предельной степени компрессии мембранного насоса на основе сверхпроницаемой мембраны из ванадия.*

### Введение

Технология селективной откачки и рециклинга, основанная на явлении сверхпроницаемости, может быть использована в топливных и в периферийных системах термоядерных реакторов [1, 2]. Авторы предлагают извлекать из откачиваемой смеси и возвращать в рабочий цикл большую часть D/T (до 99 % и более) до того, как откачиваемая смесь достигает крионасосов, которые предназначены для откачки практически только гелия и газовых примесей. Выделять топливную смесь предлагается с помощью сверхпроницаемых мембран, расположенных на пути между рабочей плазмой и крионасосами; такие мембраны способны селективно, непрерывно и с очень высокой скоростью пропускать сквозь себя водород (D/T), автоматически при этом сжимая его на порядки величины.

Наиболее эффективные материалы для практического осуществления сверхпроницаемости – металлы 5-й группы: V, Nb и Ta. Для использования в ТЯР наилучшим из них представляется ванадий – благодаря уникально низкой наведенной радиоактивности.

Однако достаточно детальные исследования явления сверхпроницаемости по всем трем изотопам водорода проводились до последнего времени лишь с ниобием [3, 4], тогда как данные по сверхпроницаемости ванадия по трем изотопам водорода практически отсутствуют.

<sup>1</sup> РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская область;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций.

## Оборудование

Исследования явления сверхпроницаемости изотопов водорода, в том числе трития, через металлы и конструкционные материалы проводились на установке "Прометей" [3–5].

Эксперименты были выполнены на ячейке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1. Так же как и в опытах с ниобием в исследовательской ячейке была размещена цилиндрическая мембрана из ванадия (диаметром 100 мм, высотой 180 мм, толщиной 0,1 мм) и атомизатор из танталовых лент. Мембрана, расположенная вертикально, герметично делит ячейку на входную и выходную камеры. Входная и выходная камеры откачиваются магнито-разрядными насосами с проводимостью  $\sigma$  18 л/с и 15 л/с соответственно. Атомизатор, расположенный внутри цилиндра мембраны, состоит из трех отдельных лент накала, которые могут быть нагреты до температуры 2300 К. Общая площадь лент атомизаторов равна 120 см<sup>2</sup>, что составляет ~ 20 % от площади мембраны.

Температура мембраны измеряется с помощью пирометрических датчиков, установленных в специальных окнах. Торцы цилиндрической мембраны прикрыты кварцевыми дисками с целью экранирования конструкционных элементов ячейки от влияния атомарных частиц.

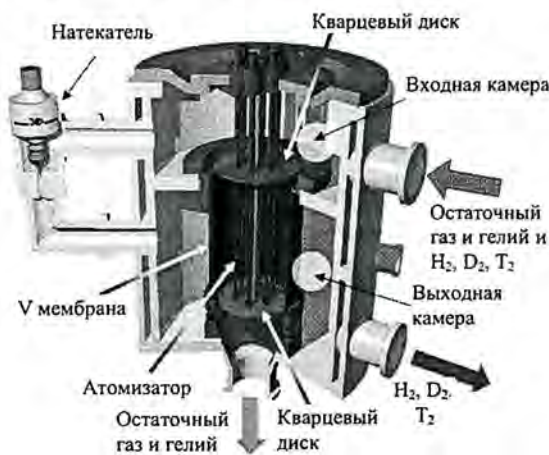


Рис. 1. Ячейка для исследования явления сверхпроницаемости

## Мембранная откачка, компрессия и рециркуляция изотопов водорода

Изначально через внутреннюю входную камеру исследуемой мембраны прокачивался постоянный поток изотопов водорода при давлении  $10^{-7}$ – $10^{-4}$  мбар. При этом для подавления процессов сорбции водорода и охрупчивания лент атомизатора их температура поддерживалась на уровне 500 К–700 К. Нагрев лент атомизатора до 1000 К–2100 К приводит к резкому повышению степени диссоциации молекул водорода (атомизации) на поверхности атомизатора. Поток атомов падает на входную поверхность мембраны, растворяется в объеме металла, проникает через мембрану и с определенной вероятностью выделяется на выходной стороне мембраны в виде молекул. В результате получаем характерную картину для явления сверхпроницаемости: давление водорода на входной стороне мембраны скачком падает, а на выходной стороне растет по мере накопления изотопов водорода в мембране до установления стационарного проникающего потока (рис. 2). После снижения температуры атомизаторов до исходных значений ("выключение" атомизаторов) давление на входе и выходе мембраны стремится вернуться к исходному состоянию.

С целью демонстрации компрессии и возможности рециркуляции проникающего потока изотопов водорода через мембрану после включения атомизатора и установления стационарного проникающего потока была остановлена откачка выходной камеры. При этом давление на выходной стороне мембраны стало расти (рис. 3) вследствие накопления проникающего через мембрану газа (режим компрессии).

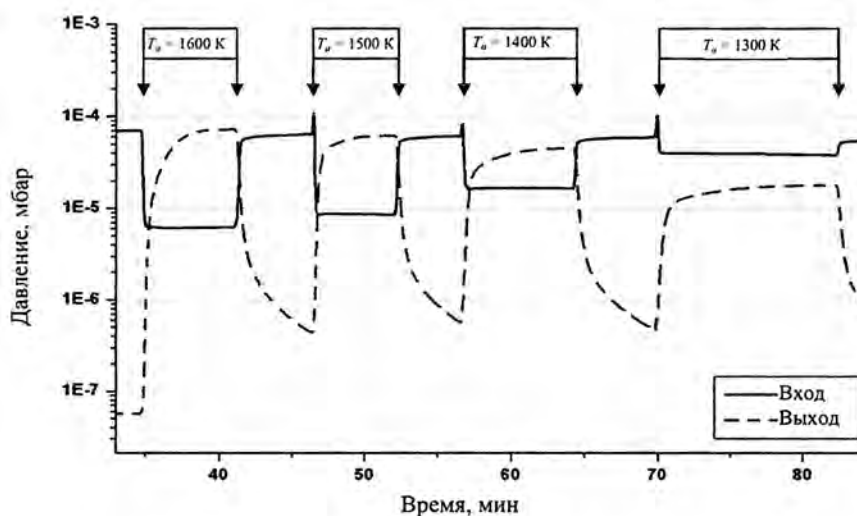


Рис. 2. Характерный вид изменения парциального давления водорода на входной и выходной сторонах ванадиевой мембраны при включении атомизатора с различной температурой поверхности

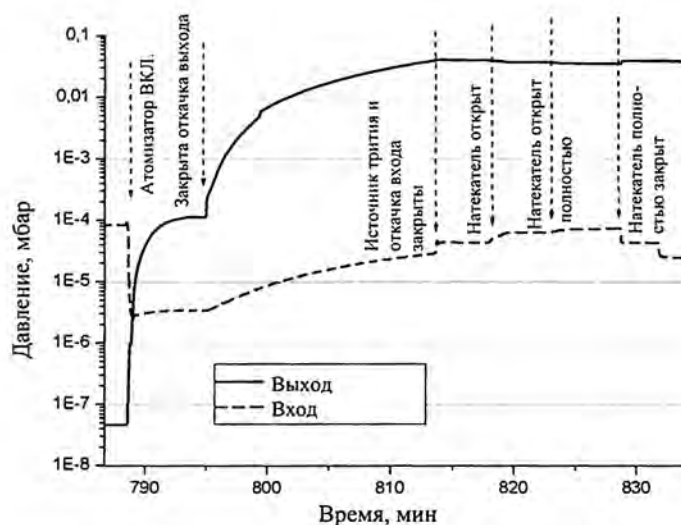


Рис. 3. Характерное изменение давлений с обеих сторон ванадиевой мембраны в режиме компрессии и рециркуляции трития

Из-за обратного проникновения молекулярного водорода с выхода на вход данный процесс одновременно сопровождался ростом давления на входной стороне. Сравнивая прирост давления на входной и выходной сторонах, можно вычислить такой важный параметр, как степень компрессии мембраны (отношение выходного и входного давления). Как видно из рис. 3, степень компрессии исследуемой мембраны составляет величину более  $10^3$ . Из представленных экспериментальных данных также следует, что мембрана имеет сильную асимметрию состояний поверхности – большая часть атомарного водорода, абсорбированного на входной стороне, выделяется

на выходной стороне. Вероятной причиной данной асимметрии является напыление тантала от атомизатора на входной поверхности мембраны. Коэффициент прилипания, рассчитанный на основании данных эксперимента, равен следующим значениям:  $\alpha_{\text{вход}} = 2 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-5}$  и  $\alpha_{\text{выход}} \sim 2 \cdot 10^{-4}$ .

Системы мембранной откачки, основанные на явлении сверхпроницаемости, позволяют не только эффективно отделять и откачивать изотопы водорода от гелия и других примесей, но и организовать прямую рециркуляцию проникающего изотопа водорода для возврата его обратно в рабочий цикл. Соединяя выходную камеру с входной камерой при помощи натекателя, на входную сторону мембраны подается поток газа, накопленный на выходной стороне мембраны (рис. 3). В эксперименте перед открытием натекателя была закрыта подача изотопов водорода на мембрану из системы напуска и отсечена откачка входной стороны мембраны. Таким образом, был создан замкнутый цикл: газ, прошедший через мембрану и накопленный в выходной камере, поступает через натекатель во входную камеру, диссоциирует на атомизаторах и проникает обратно на выход через мембрану. Регулируя пропускную способность натекателя, можно получить любое давление на входной стороне мембраны в диапазоне возможных рабочих давлений.

Оценки скорости мембранной откачки для изотопов водорода были экспериментально определены при различных температурах атомизатора посредством сравнения со скоростью откачки входной камеры. Как было показано в предыдущей работе с ниобиевой мембраной [3], скорость мембранной откачки в первом приближении обратно пропорциональна корню из молярной массы изотопов водорода. Экспериментальные данные по скорости мембранной откачки для протия, дейтерия и трития через ванадиевую мембрану в зависимости от давления газа во входной камере показаны на рис. 4 (там же для сравнения представлены данные для ниобиевой мембраны [3]). Максимальная скорость мембранной откачки составляет для протия  $\sim 2,4$  л/(см<sup>2</sup>·с), для дейтерия  $\sim 1,7$  л/(см<sup>2</sup>·с) и  $\sim 1,2$  л/(см<sup>2</sup>·с) для трития.

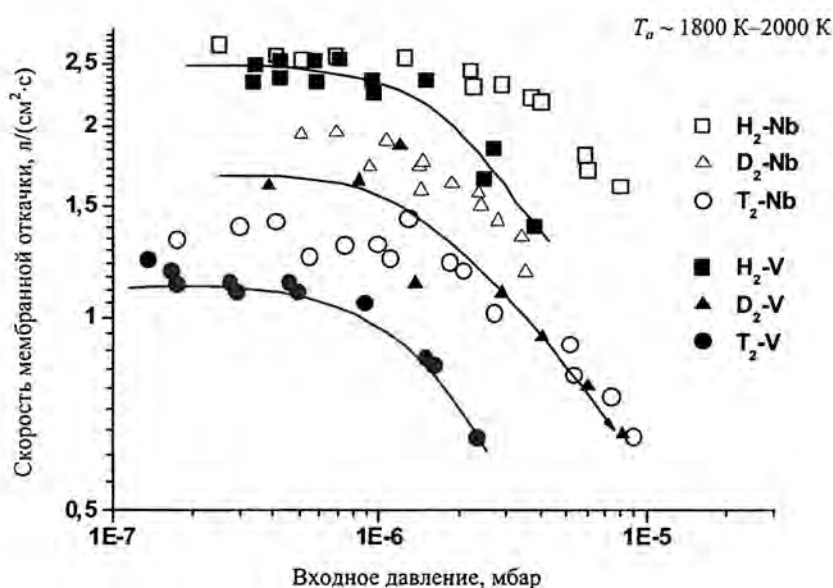


Рис. 4. Удельная скорость мембранной откачки в зависимости от входного давления изотопов водорода

### **Заключение**

На установке "Прометей" проведен цикл работ по исследованию "сверхпроницаемости" изотопов водорода через ванадиевую мембрану, в котором измерены параметры сверхпроницаемости трех изотопов водорода через ванадиевую мембрану. Показано, что максимальная удельная скорость мембранной откачки при температуре атомизатора 1800 К–2000 К и давлении  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  мбар для мембраны из ванадия составляет 2,4 л/(см<sup>2</sup>·с) для протия, 1,7 л/(см<sup>2</sup>·с) для дейтерия и 1,2 л/(см<sup>2</sup>·с) для трития. Кроме того, проведена демонстрация компрессии и рециркуляции изотопов водорода с использованием сверхпроницаемой мембраны из ванадия.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ, Проект # 2854.

### **Список литературы**

1. Livshits A. I., Notkin M. E., Samartsev A. A. Physico-chemical origin of superpermeability – large-scale effects of surface chemistry on "hot" hydrogen permeation and absorption in metals // J. Nucl. Mater. 1990, N 170. P. 79–94.
2. Livshits A. I., Notkin M. E., Pistunovich V. I. et al. Superpermeability: Critical points for Applications in Fusion // J. Nucl. Mater. 1995, N 220–222. P. 259.
3. Yukhimchuk A. A. et al. "Prometheus" setup for study of tritium superpermeation // J. Fusion Science and Technology. 2002. Vol. 41. P. 929–933.
4. Musyaev R. K. et al. Tritium superpermeability: experimental investigation and simulation of tritium recirculation in "Prometheus" setup // J. Fusion Science and Technology. 2005. Vol. 48. P. 35–38.
5. Grischechkin S. K., Golubkov A. N., Gornostaev E. V. et al. Device for investigations of tritium retention in and permeation through metals and structural materials // Hydrogen Recycling at Plasma Facing Materials, NATO Science Series, II Mathematics, Physics and Chemistry. 2000. Vol. 1. P. 339–348.

## **Study of Super-Permeability of Hydrogen Isotopes Through Vanadium Membrane at "Prometheus" Facility**

R. K. Mysyaev, B. S. Lebedev, A. A. Yukhimchuk, A. O. Busnyuk,  
A. A. Samartsev, M. E. Notkin, A. I. Livshits

*The experiments to study super-permeability phenomenon associated with interaction of hydrogen particles with metal membranes at  $10^{-7}$ – $10^{-4}$  Mbar proceeded in RFNC-VNIIEF involving "Prometheus" facility, aiming at further development of the technology of selective membrane evacuation of hydrogen isotopes to be implemented in fusion reactors.*

*Experimental results on super-permeability of thermal atoms of hydrogen isotopes, including tritium, through vanadium membrane are presented. Feasibility of the effective evacuation, compression and recuperation of hydrogen isotopes is demonstrated. Estimates of the specific evacuation rate and the limiting compression level of a membrane pump, based on super-permeable vanadium membrane, are set forth.*