

DOI: 10.53403/9785951505156_2022_32

УДК 544.022.341,544.022.382

Диффузия и удержание водорода в многослойных металлических мембранах типа {W, Cu, Fe} и {Be, Cu} в условиях повреждающего нейтронного облучения

С. С. Ананьев, Д. Н. Демидов, С. В. Суслин

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Разработана модель расчета транспортных характеристик изотопов водорода и их накопления в материалах первой стенки вакуумной камеры термоядерного/гибридного реактора, состоящей из комбинаций слоев ОЦК (Fe, W), ГЦК (Cu), ГПУ (Be) металлов при непрерывном повреждении нейтронным облучением.

Для случая W в качестве обращенного к плазме материала сформулированы граничные условия для потока изотопов водорода из плазмы в материал. Для металлической мембраны, состоящей из слоев конструкционных и функциональных материалов с характерной для первой стенки термоядерного реактора толщиной и температурой, рассчитаны температурные профили и профили концентраций удерживаемых в ловушках (радиационные вакансии, дислокации, границы зерен) и свободных изотопов водорода.

Получены оценки для количества изотопов, накопленных в материалах (ловушках) с толщинами слоев 10, 5 и 10 мм в случае мембраны {W, Cu, Fe} и 30 и 15 мм в случае мембраны {Be, Cu}. Количество удерживаемых изотопов водорода для мембраны {W, Cu, Fe} с указанными геометрическими параметрами на квадратный сантиметр такой мембраны составило от $0,7 \cdot 10^{-7}$ г/см² до $2,5 \cdot 10^{-6}$ г/см² для дейтерия и от $8,1 \cdot 10^{-7}$ до $3,6 \cdot 10^{-6}$ г/см² для трития в зависимости от типа границы между слоями материалов и температуры обращенной к плазме поверхности. Количество удерживаемого дейтерия в случае мембраны {Be, Cu} составило $1,41 \cdot 10^{-6}$ г/см², удерживаемого трития – $2,12 \cdot 10^{-6}$ г/см². Для параметров, характерных для проекта ДЕМО-ТИН, количество накопленных в материалах первой стенки и дивертора изотопов водорода оценочно составит от 2,7 до

12,4 г в случае мембраны {W, Cu, Fe} и от 7,0 до 10,5 г в случае мембраны {Be, Cu}.

Ключевые слова: *изотопы водорода, накопление водорода, проникающий поток, вольфрам, железо, медь, численное моделирование, диффузия, нейтронное повреждение, собственные точечные дефекты, термоядерный/гибридный реактор.*

Введение

К конструкционным материалам термоядерной [1, 2] или гибридной [3] установки на основе токамака [4] выдвигается ряд требований, среди которых (в первую очередь) высокая теплопроводность, низкая активированность и термомеханическая стабильность под воздействием нейтронного облучения. Материалом для стенки вакуумной камеры установки будут служить конструкционные материалы – аустенитные или ферритно-мартенситные стали, изнутри защищенные от воздействия плазмы вольфрамом, бериллием или углеродом [5].

Для проектов ДЕМО [1, 2], ИТЭР [6], ДЕМО-ТИН [4, 7] и других установок в составе элементов дивертора и первой стенки планируется использовать хром-циркониевую бронзу (Cu-Cr-Zr) – материал, обладающий уникальными свойствами: высокой теплопроводностью, близкой к теплопроводности чистой меди, и механическими свойствами, близкими к характеристикам стали [8].

В ходе работы термоядерной установки поверхность материалов будет облучаться, в том числе ионами и атомами дейтерия и трития. Будет происходить диффузия изотопов водорода сквозь многослойную «мембрану» в теплоноситель и захват водорода в объеме материалов, через которые он будет диффундировать. Усилия международного научного сообщества до недавнего времени были сконцентрированы на исследовании транспорта водорода и его накопления в обращенных к плазме материалах (Be, W, C) и конструкционных материалах (аустенитные и ферритно-мартенситные стали различных марок); между тем целесообразно рассматривать многослойные структуры конструкционных материалов, так как свойства по накоплению и проницаемости различных слоев могут значительно отличаться.

В данной работе для металлов, являющихся основами приведенных выше перспективных конструкционных и функциональных материалов (W, Cu, Fe), представлено развитие предложенной ранее модели [9] (модель была реализована в виде компьютерного кода «НИТТСР» [10]), описывающей влияние радиационной повреждаемости металлов (а именно образования радиационных вакансий) на кинетические характеристики водорода: коэффициент диффузии, поток через стенку вакуумной камеры и его накопление в материале. В модели учтены температурные зависимости коэффициентов диффузии изотопов водорода, наличие границ зерен в металлической мембране, границы между материалами в случае многослойных металлических мембран. Рассмотрены случаи границ между материалами как с наличием, так и с отсутстви-

ем диффузии водорода через границу. Изучено влияние образования радиационных, термических вакансий и наличия элементов микроструктуры (дислокации, границы зерен) на транспорт водорода и его накопление в материалах.

Описание модели

Граничные условия. На рис. 1 приведена классическая схема потоков водорода в поверхностном слое [11]. Она содержит ряд обоснованных упрощений, позволяющих произвести численные оценки, с приведенными корректировками. В рамках данной работы, помимо падающих на материал потоков I_i и I_H , учитываются: поток десорбции с поверхности рекомбинированных молекул H_2 (J_2); поток атомов водорода из адсорбированного на поверхности состояния в состояние адсорбции в приповерхностном объеме (J_3); обратный потоку J_3 поток из адсорбированного состояния в адсорбированное (J_4). Также имеет место диффузионный поток вглубь материала, однако в моделируемых образцах на этапе выявления стационарного граничного условия он не существен.

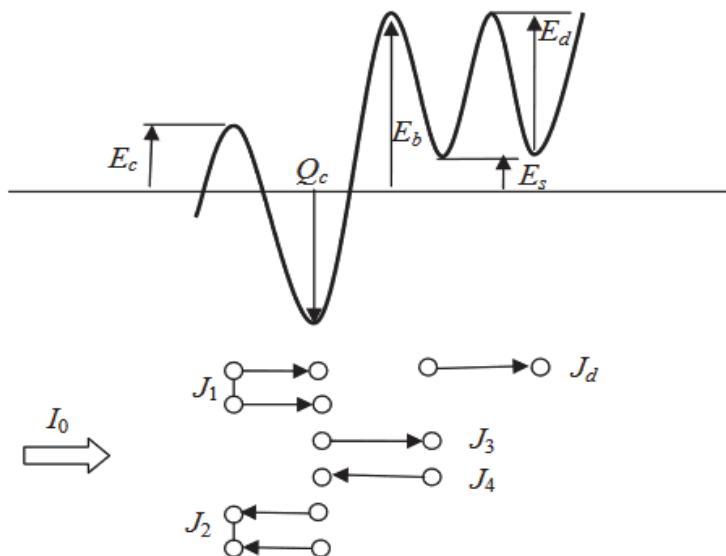


Рис. 1. Схема потоков водорода в поверхностном слое [11]

Задача моделирования проникновения изотопов водорода в материал может быть сформулирована следующим образом [12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{eff}}^{\text{H}}(x) \frac{\partial C(x)}{\partial x} \right) = 0, \\ C(0) = \sqrt{\frac{I_{\text{H}} + I_i}{2\nu\lambda^4}} \exp\left(\frac{E_c - Q_c}{kT}\right) \exp\left(-\frac{2(E_s - Q_c)}{kT}\right) + \frac{I_i}{\nu\lambda} \exp\left(\frac{2(E_b - E_s)}{kT}\right) + \frac{RI_i}{D_{\text{eff}}^{\text{H}}(0)}, \\ C(L) = S(T(L))\sqrt{P_2}, \end{cases} \quad (1)$$

где E_c – энергия активации хемосорбции; Q_c – теплота хемосорбции; E_b – энергия активации абсорбции; E_s – теплота растворения, λ – параметр решетки, ν – частота тепловых колебаний растворенного атома изотопа водорода, L – толщина моделируемого слоя, P_2 – парциальное давление водорода со стороны теплоносителя; $C(0)$ – концентрация водорода на глубине, соответствующей средней глубине внедрения иона R в обращенном к плазме материале; R – средняя глубина внедрения ионов; $D_{\text{eff}}^{\text{H}}(0)$ – эффективный коэффициент диффузии вблизи обращенной к плазме поверхности.

Отметим, что в данной работе мы проводим моделирование без учета эффекта термодиффузии. Фактически влияние градиента температуры учитывается только за счет сильной зависимости коэффициента диффузии от температуры. Как будет показано далее, такого рассмотрения достаточно для обнаружения интересующих эффектов.

Учет температурных зависимостей коэффициентов диффузии изотопов водорода. Для удобства введем следующие обозначения: H – водород. Данное обозначение используется в работе либо в случаях неразличимого поведения изотопов водорода, либо в качестве обобщающего обозначения. P , D , T – протий, дейтерий, тритий. $C_F^{\text{H}}, C_F^{\text{P}}, C_F^{\text{D}}, C_F^{\text{T}}$ [см^{-3}] – объемные концентрации свободно диффундирующего водорода, а также концентрации свободно диффундирующих изотопов – протия, дейтерия и трития соответственно. $C_R^{\text{H}}, C_R^{\text{P}}, C_R^{\text{D}}, C_R^{\text{T}}$ [см^{-3}] – объемные концентрации водорода, удерживаемого в ловушках (концентрации удерживаемых в ловушках изотопов водорода в настоящей работе рассчитываются в рамках модели [9]), а также концентрации удерживаемых изотопов – протия, дейтерия и трития соответственно.

Температурные зависимости коэффициентов диффузии изотопов H , D , T в железе взяты из работы [13]. Температурные зависимости коэффициентов диффузии протия в W , Cu и Be приводятся в [14–16] соответственно.

Для коэффициентов диффузии изотопов водорода известны соотношения [17]:

$$\frac{D^{\text{T}}}{D^{\text{H}}} = \sqrt{\frac{m_{\text{H}}}{m_{\text{T}}}}, \quad \frac{D^{\text{D}}}{D^{\text{H}}} = \sqrt{\frac{m_{\text{H}}}{m_{\text{D}}}}, \quad (2)$$

где m_{H} , m_{D} и m_{T} – атомные массы протия, дейтерия и трития соответственно. В гармоническом приближении (т. е. в приближении линейной зависимости силы, действующей со стороны кристаллической решетки на атом водорода при малых смещениях самого атома) различие изотопов оказывает влияние

только на предэкспоненциальный множитель коэффициента диффузии, поэтому коэффициенты диффузии D^T и D^D можно определить из (2).

Влияние границ между материалами на диффузию и концентрацию изотопов водорода в многослойной мембране. Для моделирования концентрационных профилей свободного и удерживаемого водорода в многослойных мембранах рассмотрены два условия сшивки для уравнения диффузии при переходе между различными материалами. В первом случае предполагается плавный переход физических свойств при переходе от одного слоя мембраны к другому. Данное поведение характерно для случая взаимной диффузии материалов, как известно, существенно ускоряемой при облучении [18] и возникающей в области сварного шва [19]. Здесь и далее такой переходный слой будем называть «граница типа I». Рассмотрим процесс установления равновесного распределения концентрации водорода в граничной области. Выделим поверхность, при переходе через которую происходит изменение состава и, соответственно, энергетических параметров моделируемой мембраны. Условно выделим «левый» и «правый» материалы. Тогда потоки из левого материала в правый и из правого в левый будут определяться соотношениями

$$\begin{aligned} J_{l \rightarrow r} &= v_l \lambda_t C_l^H \exp\left(-\frac{E_t - E_{sl}}{k_B T}\right), \\ J_{r \rightarrow l} &= v_r \lambda_t C_r^H \exp\left(-\frac{E_t - E_{sr}}{k_B T}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где $J_{l \rightarrow r}$ и $J_{r \rightarrow l}$ – потоки водорода через границу раздела материалов из левого материала в правый и из правого в левый соответственно; v_l и v_r – частота тепловых колебаний растворенного атома водорода слева и справа от границы раздела соответственно; λ_t – характерный размер границы раздела; $(E_t - E_{sl})$ и $(E_t - E_{sr})$ – энергетический барьер для перехода через границу слева направо и справа налево соответственно.

Следовательно, результирующий поток через границу равен

$$J = J_{l \rightarrow r} - J_{r \rightarrow l} = v_l \lambda_t C_l^H \exp\left(-\frac{E_t - E_{sl}}{k_B T}\right) - v_r \lambda_t C_r^H \exp\left(-\frac{E_t - E_{sr}}{k_B T}\right). \quad (4)$$

Пренебрегая направленным диффузионным потоком, получим

$$\begin{aligned} J_{l \rightarrow r} &= J_{r \rightarrow l}, \\ \frac{C_r}{C_l} &= \frac{v_l}{v_r} \exp\left(-\frac{E_{sl} - E_{sr}}{k_B T}\right) \approx \exp\left(-\frac{E_{sl} - E_{sr}}{k_B T}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

В случае границы типа I для концентраций водорода на левой и правой границах (C_l и C_r соответственно) справедливо следующее соотношение [11]:

$$\frac{C_r}{C_l} = \frac{v_l}{v_r} \exp\left(-\frac{E_{sl} - E_{sr}}{k_B T}\right) \approx \exp\left(-\frac{E_{sl} - E_{sr}}{k_B T}\right). \quad (6)$$

В случае близких величин параметров решетки для контактирующих материалов приближенно можно считать отношение концентраций равным отношению растворимостей. Поэтому в случае отсутствия диффузного слоя на границе между материалами, независимо от наличия зазора, шивка осуществляется одинаково. Такое условие на границе аналогично описанному в [11].

Для описания влияния границ типа I между материалами на коэффициент диффузии изотопов водорода можно рассмотреть два слоя металла, разделенные областью (зоной взаимной диффузии), содержащей концентрацию ловушек с энергией, соответствующей энергиям связи водорода с границами зерен в W, Fe и Cu. Они составляют для W, Fe, Cu и Be соответственно 0,5 эВ [20], 0,34–0,49 эВ [21], 0,24–0,35 эВ [22], 0,38–0,42 [23] в зависимости от типа границ. Скорректированные коэффициенты диффузии изотопа водорода через границу контакта металлов D_c^G следует рассчитывать как

$$D_c^G = D_0^G (1 - \chi_0), \quad (7)$$

где χ_0 – время, проведенное изотопом водорода в связанном состоянии внутри неподвижной ловушки [24].

Другой тип границы (граница типа II) раздела материалов предполагает резкое изменение состава и энергетических параметров. Наиболее прост в рассмотрении случай, когда между материалами нет плотного контакта. Тогда для каждого материала можно записать граничное условие, соответствующее равновесию Сивертса:

$$C_l = S_l \sqrt{P}, \quad C_r = S_r \sqrt{P}, \quad (8)$$

где S_l , S_r – растворимость водорода в материалах слева и справа от границы, P – давление в полости между материалами. При переходе через такую границу концентрация растворенного водорода претерпевает скачок:

$$\frac{C_r}{C_l} = \frac{S_r}{S_l}. \quad (9)$$

Учет наличия радиационных вакансий, дислокаций и границ зерен в металлической мембране. Расчеты стационарной концентрации вакансий (радиационных и термических) были получены как решение системы уравнений рождения и отжига радиационных дефектов, записанной для стационарного случая [9].

Существующая в металлах мембраны объемная доля границ зерен оказывает влияние и на удержание, и на коэффициенты диффузии изотопов водорода, поскольку границы зерен выступают в качестве ловушек водорода с известной концентрацией (объемной долей) и энергией связи. Аналогичную роль ловушек с фиксированной концентрацией играют дислокации. В [20–23,

25] приведены энергии взаимодействия водорода с различными типами дислокаций в W, Be, Cu, Fe соответственно.

Учет накопления изотопов водорода в ловушках типа дислокаций и границ зерен проводился методом, аналогичным приведенному в [9] (запись системы уравнения рождения и диссоциации кластеров «ловушка – n атомов водорода») для радиационных и термических вакансий, за исключением того, что дислокации и границы зерен, учет которых добавлен в настоящей работе, считались ненасыщающимися стоками по отношению к поглощающимся на них собственным точечным радиационным дефектам (вакансиям и собственным межузельным атомам) и не изменяли свою энергию связи с водородом в процессе накопления атомов водорода.

Результаты

Расчеты проводились для дислокационной плотности $\rho_d = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ и для объемной доли границ зерен $g = 4,0 \cdot 10^{-10}$ [26]. Температурные зависимости коэффициентов диффузии вакансии и собственного межузельного атома, определенные методом молекулярной динамики для Cu, получены в [27]. Энергии связи $n\text{Hv}$ комплексов приведены для Cu и Be в [28] и [29] соответственно. Кинетические и энергетические параметры радиационных дефектов для Fe и W приведены в [9]. Скорость генерации радиационных повреждений K_0 для всех рассмотренных случаев составляла $2,5 \cdot 10^{-8}$ пар Френкеля на атом в секунду [9].

Для верификации созданной методики моделирования проницаемости многослойных структур были проведены расчеты, аналогичные [30, 31].

На рис. 2 для случая границ типа I и II представлены рассчитанные профили концентраций удерживаемых в ловушках и свободных изотопов водорода в W, Cu, Fe вдоль поперечного сечения мембраны. Графики построены для температуры 1300 K на обращенной к плазме границе W. Толщина слоев мембраны {W, Cu, Fe} была выбрана 10, 5 и 10 мм для W, Cu, Fe соответственно, что вполне характерно для проектов ДЕМО; при этом охлаждение подразумевалось со стороны меди. Температура охлаждаемой поверхности ($T_{\text{охл}}$) Cu составляла 450 K.

В Fe при низких температурах наблюдается резкое повышение концентрации удерживаемого в ловушках водорода. Данная особенность объясняется накоплением вакансий под действием повреждающего нейтронного облучения, что облегчает захват ими водорода, а также снижением возможности водорода покинуть ловушку вследствие низкой температуры. Различные изотопы водорода одинаково захватываются и удерживаются ловушками в металле в рамках сделанных модельных представлений для определения коэффициентов диффузии изотопов, используемых в настоящей работе.

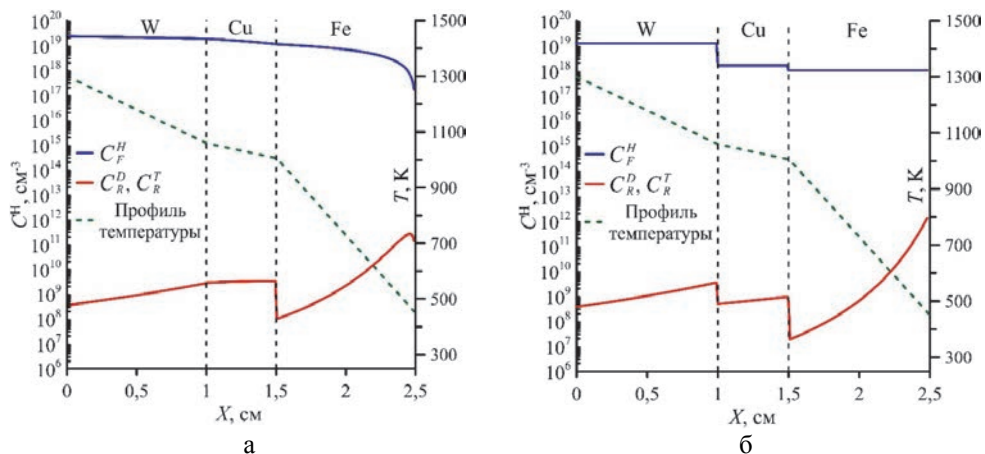


Рис. 2. Концентрации свободного и удерживаемого в ловушках дейтерия и трития в мембране {W, Cu, Fe}. $T_W = 1300$ К, а – границы типа I, б – границы типа II

В случае границ типа II распределение концентрации водорода определяется в первую очередь растворимостью водорода на границе материалов и количеством водорода, попавшего в материал из плазмы. При этом уменьшение концентрации по мере удаления от обращенной к плазме поверхности практически незаметно на фоне граничных эффектов. Вследствие того, что на границе между материалами перенос водорода между слоями мембраны происходит согласно (б), концентрация водорода в слое Fe и в ряде случаев в слое Cu (рис. 2, б) ниже, чем в случае границ типа I, что приводит к заметному снижению концентраций удерживаемого в ловушках дейтерия и трития. Полученные оценки для количества накопленных в материалах (ловушках) изотопов для рассматриваемой мембраны {W, Cu, Fe} составляют $1,0\text{--}2,5 \cdot 10^{-6}$ г/см² для дейтерия и $1,1\text{--}3,6 \cdot 10^{-6}$ г/см² для трития (границы типа I) и $0,7 \cdot 10^{-7}\text{--}5,5 \cdot 10^{-7}$ г/см² для дейтерия и $0,9 \cdot 10^{-7}\text{--}8,1 \cdot 10^{-7}$ г/см² для трития (границы типа II) в зависимости от температуры обращенной к плазме поверхности W в диапазоне 1300–1500 К. Общее количество накопленных в материалах первой стенки и дивертора изотопов водорода (дейтерия и трития) в предположении их равной концентрации в материале) оценочно составит от 2,7 до 12,4 г в случае мембраны {W, Cu, Fe} для параметров, характерных для проекта ДЕМО-ТИН.

Для моделирования мембраны {Be, Cu} были выбраны толщины слоев 3,0 мм для Be и 1,5 мм для Cu, поскольку в проекте ДЕМО-ТИН предполагается применение более тонких слоев при использовании бериллия в качестве ОПМ [32]. T_{Be} составляла 900 К, температура охлаждаемого медного слоя $T_{охл} = 120$ К. Поскольку фазовая диаграмма Be–Cu при рассматриваемых температурах подразумевает образование различных фаз, изучался случай плавной границы между металлами (граница I типа).

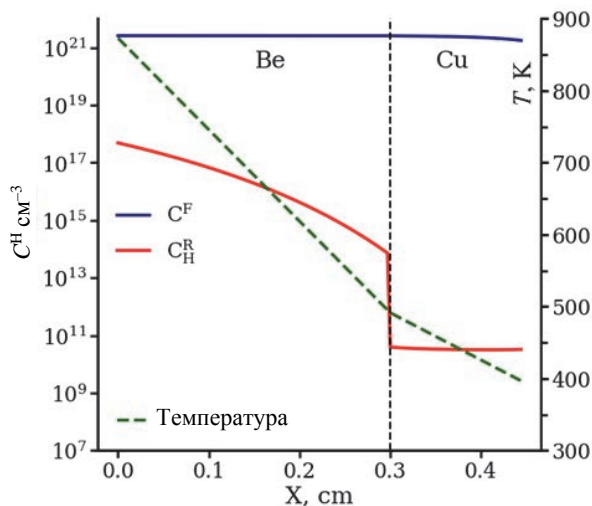


Рис. 3. Концентрации свободного и удерживаемого в ловушках дейтерия в мембране {Be, Cu}. $T_{\text{Be}} = 900$ К, рассмотрен случай границ типа I

Можно видеть, что с уменьшением температуры от 900 до 500 К наблюдается снижение количества удерживаемых изотопов водорода в Be. Данное явление объясняется уменьшением концентрации термических вакансий, служащих ловушками для изотопов водорода. Количество удерживаемого дейтерия в случае мембраны {Be, Cu} составило $1,41 \cdot 10^{-6}$ г/см², удерживаемого трития – $2,12 \cdot 10^{-6}$ г/см². Общее количество накопленных в материалах первой стенки и дивертора изотопов водорода в случае мембраны {Be, Cu} оценочно составит от 7,0 до 10,5 г для параметров, характерных для проекта ДЕМО-ТИН.

Из приведенных выше оценок количества удерживаемых изотопов водорода видно, что в зависимости от температуры поверхности W, обращенной к плазме, объемная концентрация свободного и удерживаемого водорода (и, следовательно, количество удерживаемых изотопов) увеличивается на порядок при уменьшении температуры с 1500 до 1300 К. Данное явление можно объяснить, проведя расчеты зависимостей проникающего через мембрану потока водорода от температуры обращенной к плазме поверхности (рис. 4,а) и температуры охлаждаемой поверхности (рис. 4,б).

В случае, если граничное условие определяется равновесием потока ионной имплантации и десорбции, проникающий в материал поток водорода практически не зависит от температуры стенки, в то время как скорость десорбции при повышении температуры возрастает. Поэтому при более высокой температуре баланс потоков «внутри материала» и «из материала» достигается при более низких концентрациях водорода. В области температур ниже 1300 К (см. рис. 4,а), наоборот, при понижении температуры уменьшается поток через мембрану. Это происходит потому, что градиент температуры в мембране становится меньше и эффективный коэффициент диффузии в медной прослойке становится сравним с коэффициентом диффузии на охлаждаемой поверхности Fe.

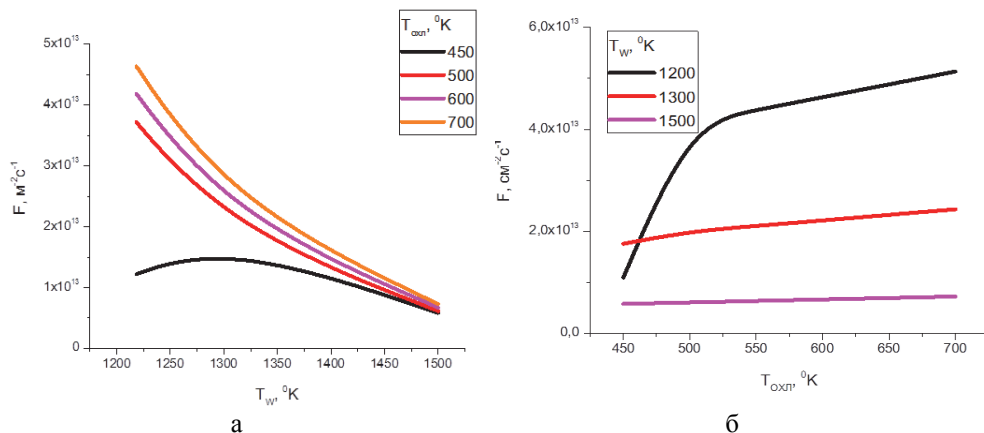


Рис. 4. Зависимость потока водорода через мембрану {W, Cu, Fe}: а – от температуры обращенной к плазме поверхности (T_w), температура охлаждаемой поверхности Cu $T_{\text{охл}} = 450\text{--}700$ К; б – от температуры $T_{\text{охл}}$, рассматриваемый температурный диапазон для $T_w 1200\text{--}1500$ К

Таким образом, слои с наименьшим эффективным коэффициентом диффузии выступают в роли барьера, препятствующего дальнейшему проникновению водорода.

Заключение

В рамках развития выбранного ранее подхода [9] разработана модель диффузии изотопов водорода и их накопления в ловушках (их в модели не видно) для многослойных металлических мембран {W, Cu, Fe} и {Be, Cu} с различными типами границ между слоями, с поверхностями W и Be, обращенными к плазме, и охлаждаемой поверхностью Cu. В модели учтено: влияние повреждающего нейтронного облучения (образование и отжиг радиационных вакансий), температурные зависимости коэффициентов диффузии изотопов водорода, наличие дислокаций и границ зерен в металлической мембране, границы между материалами.

В Fe в температурной области $T < 600$ К наблюдается резкое повышение концентрации удерживаемого в ловушках водорода.

В области $T > 1100$ К в W концентрация удерживаемого водорода на 6–7 порядков меньше концентрации свободного водорода, а в промежуточной области температур 1000–1100 К в Cu наблюдается заметное повышение концентрации удерживаемого водорода по сравнению с W, и уже до 0,001 % всего дейтерия и трития, попавшего в этот слой мембраны, оказывается удерживаемым.

С уменьшением T от 900 до 500 К наблюдается уменьшение концентрации удерживаемых изотопов водорода в Be.

Показано, что с уменьшением температуры границы W, обращенной к плазме, объемная концентрация свободного и, следовательно, и удерживаемого водорода увеличивается на порядок с уменьшением температуры с 1500 до 1300 К.

Полученные профили концентраций свободного и удерживаемого в ловушках водорода хорошо согласуются с рассчитанными зависимостями потоков водорода через мембрану от температур обращенной к плазме поверхности W и охлаждаемой поверхности Fe , которые позволяют определить, в каком слое мембраны коэффициент диффузии водорода «лимитирует» проницаемость через всю мембрану.

Оценка количества удерживаемых изотопов водорода для мембраны $\{W, Cu, Fe\}$ составила от $0,7 \cdot 10^{-7}$ г/см² до $2,5 \cdot 10^{-6}$ г/см² для дейтерия и от $8,1 \cdot 10^{-7}$ до $3,6 \cdot 10^{-6}$ г/см² для трития в зависимости от типа границы и температуры обращенной к плазме поверхности. Количество удерживаемого дейтерия в случае мембраны $\{Be, Cu\}$ составило $1,41 \cdot 10^{-6}$ г/см², удерживаемого трития – $2,12 \cdot 10^{-6}$ г/см². Для параметров, характерных для проекта ДЕМО-ТИН, количество накопленных в материалах первой стенки и дивертора изотопов водорода оценочно составит от 2,7 до 12,4 г в случае мембраны $\{W, Cu, Fe\}$ и от 7,0 до 10,5 г в случае мембраны $\{Be, Cu\}$.

Отметим, что для границы типа II в случае наличия зазора между материалами количество водорода, содержащееся в полостях в виде газа, остается неопределенным, поэтому проведенная здесь оценка удержания изотопов водорода является заниженной.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

Список литературы

1. Субботин М. Л., Курбатов Д. К., Филимонова Е. А. Обзор состояния исследований демонстрационных термоядерных реакторов в мире // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2010. Т. 3. С. 55–74.
2. Technical Basis for the ITER-FEAT Final Design Report, International Atomic Energy Agency (IAEA). – Vienna, 2001.
3. Kuteev B. V., Goncharov P. R., Fusion-fission hybrid systems: yesterday, today, and tomorrow // Fusion Sci. and Tech. 2020. Vol. 76(7). P. 836–847 [doi: 10.1080/15361055.2020.1817701].
4. Kuteev B., Azizov E., Alexeev P. et al. Development of DEMO-FNS tokamak for fusion and hybrid technologies // Nucl. Fusion. 2015. Vol. 55(7). P. 073035 [doi: 10.1088/0029-5515/55/7/073035].
5. Iafrazi M. et al. // 6th IAEA DEMO Workshop. Moscow, 1–4 October 2019.
6. Jeong-Yong Park, Byung-Kwon Choi, Jung-Suk Lee et al. // Fusion Engin. and Design. 2009. Vol. 84, Issue 7–11. P. 1468–1471.
7. Sergeev V. Yu., Kuteev B. V. et al. // Nucl. Fusion. 2015. Vol. 55. P. 123013 [doi: 10.1088/0029-5515/55/12/123013].
8. Mazul I. // 6th IAEA DEMO Workshop. Moscow, 1–4 October 2019.

9. Ананьев С. С., Демидов Д. Н., Суслин С. В. Транспорт водорода и его накопление в вакансиях в процессе повреждающего нейтронного облучения в ОЦК-металлах Fe и W // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. Вып. 2. С. 13–24 [doi: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-13-24].
10. Свидетельство № 12, 2020661650 / Программа расчета транспортных характеристик и концентрации захваченных изотопов водорода в конструкционных материалах гибридных и термоядерных реакторов «НИТТСР» / С. С. Ананьев.
11. Писарев А. А., Цветков И. В., Маренков Е. Д., Ярко С. С. Проницаемость водорода через металлы : учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2008.
12. Doyle B. L. A simple theory for maximum H inventory and release: a new transport parameter strain // J. Nucl. Mater. 1982. Vol. 111–112. P. 628–635 [doi: 10.1016/0022-3115(82)90277-x].
13. Sivak A., Sivak P. Energetic, crystallographic and diffusion characteristics of hydrogen isotopes in iron // J. Nucl. Mater. 2015. Vol. 461. P. 308–313 [doi: 10.1016/j.jnucmat.2015.03.03].
14. Zhang X., Xu K. Hydrogen diffusion behavior in tungsten under anisotropic strain // J. Nucl. Mater. 2018. Vol. 511. P. 574–581 [doi: 10.1016/j.jnucmat.2018.05.061].
15. Magnusson H., Frisk K. Diffusion, permeation and solubility of hydrogen in copper // J. Phase Equilib. Diffus. 2017. Vol. 38. P. 65–69 [doi: 10.1007/s11669-017-0518-y].
16. Ferry L., Virot F., Ferro Y. et al. Diffusivity of hydrogen and properties of point defects in beryllium investigated by DFT // J. of Nucl. Mater. 2019. Vol. 524. P. 323–329 [doi: 10.1016/j.jnucmat.2019.07.016].
17. Causey R. A., Karnesky R. A., San Marchi C. Tritium barriers and tritium diffusion in fusion reactors // Comprehensive Nucl. Mater. 2012. Vol. 4. P. 511–549 [doi: 10.1016/B978-0-08-056033-5.00116-6].
18. Ding F., Averbach R. S., Hahn H. Radiation-enhanced diffusion in Ni/Zr diffusion couples // J. of Appl. Phys., 1988. Vol. 64(4). P. 1785–1790 [doi: 10.1063/1.341776].
19. Wei Y., Li J., Xiong J., Zhang F. Investigation of interdiffusion and intermetallic compounds in Al–Cu joint produced by continuous drive friction welding // Engin. Sci. and Tech. 2016. Vol. 19(1). P. 90–95 [doi: 10.1016/j.jestch.2015.05.009].
20. Grigorev P. Yu., Terentyev D. A. et al. Interaction of hydrogen with dislocations and grain boundaries in tungsten // J. of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2015. Vol. 9, N 6. P. 1287–1292 [doi: 10.1134/S1027451015060270].
21. Matsumoto R., Riku M. et al. Hydrogen grain boundary interaction in Fe, Fe–C, and Fe–N systems // Progress in Nucl. Sci. and Tech. 2011. Vol. 2. P. 9–15 [doi: 10.15669/pnst.2.9].

22. Zhou X., Marchand D. et al. Chemomechanical origin of hydrogen trapping at grain boundaries in FCC metals // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116. P. 075502 [doi: 10.1103/PhysRevLett.116.075502].
23. De Temmerman G., Heinola K., Borodin D. et al. Data on erosion and hydrogen fuel retention in beryllium plasma-facing materials // *Nucl. Mater. and Energy*. 2021. Vol. 27. P. 100994 [doi: 10.1016/j.nme.2021.100994].
24. Демидов Д. Н., Сивак А. Б., Сивак П. А. Термическая диссоциация ди-межузлий в ОЦК Fe и V: молекулярно-динамическое исследование // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. 2019. Т. 42. Вып. 2. С. 99–107 [doi: 10.21517/0202-3822-2019-42-2-99-107].
25. Tehranchi A., Zhang X., Lu G. Hydrogen-vacancy-dislocation interactions in α -Fe // *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 25. P. 025001 [doi: 10.1088/1361-651X/aa52cb].
26. Zinkle S. J., Snead L. L. Designing radiation resistance in materials for fusion energy // *Ann. Rev. Mat. Res.* 2014. Vol. 44. P. 241–267.
27. Сивак А. Б., Демидов Д. Н., Сивак П. А., Диффузионные характеристики собственных точечных дефектов в меди: молекулярно-динамическое исследование // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*. 2021. Т. 44. Вып. 1. С. 106–118 [doi: 10.21517/0202-3822-2020-44-1-106-118].
28. Korzhavyy P. A., Sandström R. Monovacancy in copper: trapping efficiency for hydrogen and oxygen impurities // *Computational Mater. Sci.* 2014. Vol. 84. P. 122–128 [doi: 10.1016/j.commatsci.2013.11.065].
29. Ganchenkova M. G., Borodin V. A., Nieminen R. M. Hydrogen in beryllium: solubility, transport, and trapping // *Phys. Rev. B.* 2009. Vol. 79(13). P. 134101 [doi: 10.1103/physrevb.79.134101].
30. You J. H., Visca E., Barrett T. et al. European divertor target concepts for DEMO: design rationales and high heat flux performance // *Nucl. Mater. and Energy*. 2018. Vol. 16. P. 1–113 [doi: 10.1016/j.nme.2018.05.012].
31. Katayama K., Someya Y., Tobita K. Estimation of tritium permeation rate to cooling water in fusion DEMO condition. fusion science and technology // *Fusion Sci. and Tech.* 2017. Vol.71. P. 261–267 [doi: 10.1080/15361055.2017.1288423].
32. Shpanskiy Yu. S. and the DEMO-FNS Project Team // *Nucl. Fusion*. 2019. Vol. 59. P. 076014 [doi: 10.1088/1741-4326/ab14a8].