

На правах рукописи

Маренков Евгений Дмитриевич

**Влияние транспорта водорода в первой стенке
термоядерных реакторов на рециклинг**

Специальность 01.04.08 — Физика плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Автор:



Москва 2013

Работа выполнена в Национальной исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика плазмы» НИЯУ МИФИ Цветков Игорь Владимирович

Официальные оппоненты: Хвесьюк Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплофизики МГТУ им. Н.Э. Баумана
Цвентух Михаил Михайлович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Отдела физической электроники Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН)

Ведущая организация: Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Защита состоится 17 апреля 2013 г. в 16:30 на заседании диссертационного совета Д 212.130.05 в НИЯУ МИФИ по адресу: Москва, 115409, Каширское шоссе, 31, корпус «К», ауд. К-608, тел: 324-84-96, 323-95-26. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации.

Автореферат разослан « 16 » марта 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Р.С. Стариков

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Взаимодействие плазмы со стенкой представляет собой сложную проблему физики термоядерных реакторов. Процессы взаимодействия важны для выбора материалов стенки термоядерного реактора, а также для его правильной эксплуатации, учитывающей ограничения, накладываемые взаимодействием со стенкой. Активные исследования в этой области, хотя и прояснили большое число вопросов, связанных с взаимодействием плазмы с твердыми телами, все же оставляют и не меньше еще не понятых проблем. Состояние исследований в этой области отражены в большом количестве книг и обзоров. Особенно трудно дается понимание явлений, связанных с взаимным влиянием процессов, происходящих в пристеночной плазме, и процессов рециклинга изотопов водорода в первой стенке.

Можно выделить следующие три проблемы, играющие ключевую роль во взаимодействии плазмы с материалом первой стенки:

1. время жизни обращенных к плазме материалов;
2. образование пыли;
3. накопление трития в материалах вакуумной камеры.

Последние два пункта определяют пределы безопасной эксплуатации установки. Это связано с тем, что всегда существует опасность случайного контакта с окружающей средой токсичных (бериллий) и радиоактивных (из-за накопления в них трития) материалов. Кроме того, при возникновении случайной течи воды возможно активное выделение водорода, что, в случае прорыва воздуха, взрывоопасно само по себе, а присутствие пыли, служащей катализатором, усугубит последствия такого взрыва. Ясно также, что количество накопленного

в камере трития должно быть настолько минимальным, насколько это возможно, с тем, чтобы избежать загрязнения окружающей среды и эвакуации местного населения из-за его случайного высвобождения. В соответствии с этим, для международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР (ITER — International Thermonuclear Experimental Reactor) установлены следующие «административные» пределы, которые гарантируют, что предельные с точки зрения безопасности значения не будут достигнуты даже с учетом погрешности измерений: 670 кг пыли и 700 г накопленного в камере трития.

Понимание важности процессов взаимодействия плазмы с первой стенкой токамаков стимулировало большое количество как экспериментальных, так и теоретических работ в этой области. Разработаны компьютерные коды, позволяющие моделировать процессы переноса в пристеночной плазме (UEDGE, ERO, SOLPS и т.п.); достигнут существенный прогресс в понимании нестационарных (off-normal) процессов в токамаке, таких как срывы, MARFE, ЭЛМы (ELM), возникновение «горячих точек» (hot spots) и т.д. Накопление и транспорт изотопов водорода в материалах, которые планируется использовать в первой стенке (бериллий, вольфрам и СС-композит), также являются объектом интенсивного исследования. Анализ экспериментальных данных показывает, что транспорт водорода в чистых материалах определяется процессами диффузии, захвата/выхода из дефектов различных типов, накоплением в порах и поверхностными процессами. В условиях первой стенки, однако, большую роль играет также эрозия и перенапыление эродированных частиц, что может существенно изменить свойства материала.

Вместе с тем, эксперименты на существующих в настоящее время токамаках показывают, что процессы, обычно ассоциируемые с чисто «плазменными» эффектами, оказывают влияние на транспорт изотопов водорода в стенке, и наоборот. Примерами такого взаимного вли-

яния могут служить резкая десорбция большого количества водорода во время MARFE и срывов, ЭЛМов, появление на стенке «горячих точек» (hot spots) и т.п. В тоже время, большинство экспериментальных работ по изучению взаимодействия плазмы со стенкой делается в лабораторных условиях не на токамаках, а на модельных установках, в которых материал подвергается воздействию плазмы или облучению ионным пучком с параметрами, близкими к ожидаемым в термоядерных реакторах. Результаты, полученные в таких условиях, не могут учесть взаимного влияния процессов, происходящих в пристеночной плазме токамаков и процессов, отвечающих за транспорт водорода на стенке. В большинстве теоретических работ такое взаимное влияние также не учитывается, т.к., из-за своей сложности, даже расчет этих процессов независимо друг от друга наталкивается на существенные трудности. Например, известно, что хорошее удержание плазмы в Н-режиме связано с установлением полоидального профиля плотности плазмы с резким градиентом на периферии («пьедестал плотности»). Во время вспышки ЭЛМа этот пьедестал разрушается, а после — восстанавливается. На настоящий момент механизм этого процесса не ясен, хотя понятно, что процессы рециклинга могут оказывать влияние на изменение плотности периферийной плазмы и, следовательно, на восстановление пьедестала.

Большинство конструктивных элементов токамаков, контактирующих с плазмой, представляет собой многослойные структуры, и расчет накопления и транспорта в них водорода должен это учитывать. Кроме того, использование защитных покрытий является одним из возможных способов снижения накопления водорода в контактирующих с плазмой материалах. Например, рассматривается применение вольфрамовых покрытий, напыление α -алюминия на сталь Eurofer для снижения проницаемости через нее водорода, покрытие стали оксидом эрбия и т.д. Задача проницаемости из газа через перегородки

(«мембраны») имеет также другое применение. Любое моделирование поведения водорода в материале требует знания большого числа параметров (коэффициенты диффузии, растворимости, рекомбинации и т.п.), описывающих его взаимодействие с данным материалом. Эксперименты по проницаемости водорода через перегородки, сделанные из соответствующего материала, являются одним из методов их определения.

На примере однослойных мембран известно, что поверхностные процессы могут оказывать существенное влияние на проницаемость и накопление в них водорода. Такое влияние должно иметь место и для материалов, состоящих из большего числа слоев. Однако, все расчеты проницаемости и накопления в многослойных материалах делаются в предположении, что транспорт водорода в них контролируется только диффузией, при этом поверхностные процессы не принимаются во внимание.

Несмотря на большое количество различных процессов, участвующих в транспорте водорода в твердом теле, на практике транспорт чаще всего описывается с помощью решения уравнений переноса (уравнение диффузии для водорода в поле ловушек). Существует несколько кодов для решения этих уравнений, из которых код ТМАР является одним из наиболее часто используемых. Вместе с тем, в коде ТМАР7 может рассматриваться не более трех различных типов ловушек, отличающихся энергиями связи с ними водорода. Однако, некоторые эксперименты могут быть удовлетворительно объяснены только при учете значительно большего количества типов ловушек (например, термодесорбционные спектры водорода из вольфрама с примесью карбида титана; вольфрама, подвергнутого нейтронному облучению и т.п.). В связи с этим разумно предположить, что в материалах со сложной структурой (например, перенапыленные слои на первой стенке) более адекватной моделью транспорта является введе-

ние непрерывного распределения ловушек по энергиям связи с ними водорода.

В соответствии с указанными проблемами была сформулирована цель данной работы.

Цель

Целью данной работы является исследование роли различных процессов, отвечающих за транспорт водорода в первой стенке токамаков, в рециклинге. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать возможную роль термической неустойчивости, связанной с взаимодействием плазмы со стенкой, как триггера процессов, сопровождающихся резким усилением десорбции изотопов водорода из материала первой стенки.
2. Исследовать роль первой стенки в восстановлении пьедестала после вспышки ЭЛМа.
3. Разработать модель проницаемости и накопления изотопов водорода в многослойных материалах, учитывающую поверхностные процессы.
4. Разработать модель транспорта изотопов водорода в материалах с широким распределением ловушек по энергии выхода.

На защиту выносятся следующие результаты, содержащие научную новизну:

1. Модель развития термической неустойчивости и критерии ее возникновения в двух предельных случаях, когда выход водорода из стенки определяется диффузией или десорбцией первого порядка.

2. Нульмерная модель реакции первой стенки токамака на вспышки ЭЛМа и условия, в которых газовыделение из первой стенки токамака может играть роль в восстановлении пьедестала после вспышки.
3. Компьютерный код, основанный на разработанной модели транспорта изотопов водорода в материалах с учетом теплопроводности, транспорта и возникновения дефектов, взаимодействия водорода с дефектами и междоузельными атомами, диффузии растворенного водорода. Результаты компьютерного моделирования реакции стенки на вспышку ЭЛМа, оценка влияния бериллиевой стенки на восстановление пьедестала H-моды.
4. Модель проницаемости водорода в многослойных материалах в стационарном режиме с учетом поверхностных процессов.
5. Анализ качественных изменений в газовыделении из материала, вызванных наличием дефектов с непрерывным распределением по энергиям выхода водорода.

Научная и практическая значимость работы

Результаты исследования представляют фундаментальный интерес для понимания процессов взаимодействия плазмы с первой стенкой. Разработанные модели могут использоваться в обработке экспериментов по термодесорбции и газовыделению из образцов, являющихся одним из основных методов изучения процессов накопления изотопов водорода в твердом теле, а также для расчета проницаемости и накопления изотопов водорода в многослойных материалах. Результаты проведенных исследований могут найти применение для оценки накопления, проникающего потока и обратного газовыделения трития из материалов первой стенки токамака с целью определения оптимальных режимов эксплуатации реактора.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. 16 конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью», Москва, НИЯУ МИФИ, 2013
2. 13th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications and 1st International Conference on Fusion Energy Materials Science (PFMC), Rosenheim, Germany, 2011
3. 20th international conference PSI-2012. Aachen, Germany, 2012
4. 15 конференция «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, НИЯУ МИФИ, 2012
5. 20 international conference Ion-Surface Interactions (ISI)-2011, Zvenigorod, Russia, 2011
6. 19 international conference IonSurface Interactions ISI-2009, Zvenigorod, Russia
7. 18 international conference IonSurface Interactions ISI-2007, Zvenigorod, Russia
8. International conference of atomic collisions on surfaces ICACS-24, Krakow, Poland, 2012
9. Четвертая международная конференция «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-2008»
10. Третья международной конференция «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-2007»
11. Научная сессия МИФИ-2007, Москва, НИЯУ МИФИ

12. Учебно-научная конференция-конкурс по физике УНК-2007, Москва, ФИАН

По результатам исследований опубликовано 19 печатных работ, из них 5 — в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК (см. список публикаций).

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 114 страниц с 45 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 116 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи исследования, представляются основные положения, выносимые на защиту.

Литературный обзор посвящен основным вопросам транспорта водорода в твердом теле и их роли в процессах рециклинга на первой стенке токамаков. Рассмотрены основные модели, использующиеся для описания взаимодействия ионов с твердым телом. Кратко рассмотрены существующие на сегодняшний день теории развития ЭЛ-Мов, срывов и прочих нестационарных процессов в токамаках, при этом внимание сосредоточено на возможной роли рециклинга водорода в этих процессах.

В главе «Термическая неустойчивость» рассмотрены две модели описания термической неустойчивости, связанной с взаимодействием плазмы со стенкой. Предполагается, что развитие этой неустойчивости может служить одним из триггеров для таких процессов, как MARFE или срывы. Качественно возникновение неустойчивости объясняется следующим образом. Небольшое изначальное увеличение температуры поверхности стенки приводит к увеличению скорости десорбции водорода, что приводит к увеличению концентрации плазмы и, следовательно, к росту потерь энергии на излучение и перезарядку, т.е. к увеличению потока тепла из плазмы на стенку, вызывая, таким образом, дальнейший рост ее температуры. Возникающая положительная обратная связь и приводит к раскачке неустойчивости.

Чтобы получить критерии возникновения неустойчивости, мы использовали нульмерные уравнения для баланса частиц и энергии в плазме, и одномерное уравнение теплопроводности для учета изменения температуры стенки. В первой модели десорбция водорода из стенки определялась выходом из ловушек без учета диффузии, а во второй — только диффузией. Для обоих случаев методом малых воз-

мущений были получены дисперсионные уравнения, а из них — условия развития неустойчивости. В случае десорбции первого порядка, когда предполагается, что выход водорода происходит из ловушек одного типа, характеризующихся энергией выхода E_t , этот критерий имеет вид:

$$\varepsilon > 1 + \frac{\tau_p}{1 - \bar{h}} \left(\frac{1}{\tau_E} + \frac{1}{\tau_W} \right) \quad (1)$$

Здесь τ_E — характерное время удержания энергии в плазме, τ_p — характерное время удержания частиц в плазме, а $\tau_W = \bar{N}/\bar{\Gamma}$ есть отношению количества водорода в стенке \bar{N} к потоку водорода из стенки $\bar{\Gamma}$ в равновесии и представляет собой, поэтому, время удержания водорода в стенке. Особую роль играет параметр

$$\varepsilon = 2 \frac{E_t}{\bar{T}_0} \frac{\bar{T}_0 - \bar{T}_r}{\bar{T}_0} \xi_r$$

характеризующий, в конечном итоге, реакцию стенки. Здесь \bar{T}_0, \bar{T}_r — температуры обращенной к плазме и внешней поверхностей стенки в стационарном режиме. Величина $\xi_r = \bar{n}^2 R/H$ определяет отношение стационарных потерь на излучение и перезарядку $\bar{n}^2 R$ (\bar{n} — плотность плазмы, R — коэффициент пропорциональности), к эффективной мощности нагрева H . Параметр $1 - \bar{h}$ равен отношению потока из стенки только за счет десорбции, $\bar{N} \exp(-E_t/\bar{T}_0)/\tau_t$, к потоку из плазмы на стенку, $\bar{\Gamma}$ в равновесии, где τ_t — характерное время выхода из ловушек.

Таким образом, возможность возникновения неустойчивости определяется безразмерными параметрами ε, \bar{h} и временами удержания энергии и частиц. При этом характерные значения $\varepsilon \sim 10 \div 30$, времена $\tau_{E,p}$ обычно порядка 1 с, а \bar{h} и τ_W могут меняться в очень широких пределах из-за их экспоненциальной зависимости от температуры. Из критерия (1) видно, что неустойчивость вероятна для больших ε , что соответствует, прежде всего, большой доле потерь ξ_r (температура и

энергия входят также в правую часть неравенства и поэтому их влияние сложнее).

На практике выполнение условия (1) возможно, только если температура стенки остается в определенном диапазоне, зависящем от параметров взаимодействия плазмы со стенкой. При типичных для токамаков параметрах (поток на стенку порядка 10^{15} см $^{-2}$ с $^{-1}$, время удержания энергии и частиц $\tau_E \sim \tau_p \sim 1$ с, энергия десорбции $E_t \sim 1$ эВ) этот диапазон лежит в районе 600 К. Вместе с тем, на практике выход водорода часто определяется не одним, а несколькими типами ловушек, отличающихся энергиям связи E_t . Так как каждая из этих энергий дает свой температурный диапазон развития неустойчивости, реальные температуры стенки, при которых возникает неустойчивость, могут лежать в гораздо более широких пределах.

Условие (1) было получено из приближения малых возмущений, которое может не выполняться на практике. Поэтому мы также выполнили численное решение уравнений, определяющих развитие неустойчивости. Результаты моделирования подтверждают аналитические оценки даже если условие малости возмущения не выполнено.

Аналогичный анализ был приведен для случая, когда десорбция водорода из стенки определяется диффузией. Как и в предыдущем приближении, возникновение неустойчивости определяется параметром ε , в котором вместо энергии связи с ловушками E_t стоит энергия активации диффузии E_d . Кроме того, большую роль играет величина $\bar{s} = \tau_T \bar{\Gamma} / n_{max} x_{imp}$, где τ_T — характерное время теплопроводности, $\bar{\Gamma}$ — поток водорода из плазмы на стенку, x_{imp} — глубина внедрения водорода в стенку, а n_{max} — максимальная плотность водорода, достижимая в материале стенки. Развитие неустойчивости маловероятно для значений $\bar{s} \gg 1$. Для случая $\bar{s} \ll 1$ критерий развития неустойчивости может быть записан в довольно простой форме:

$$\varepsilon \gtrsim \sqrt{1 + \frac{\tau_T}{\tau_p}}.$$

Оценки, выполненные на основе полученных выражений для вольфрамовой стенки показывают, что для общепринятого коэффициента диффузии

$$D = 3.5 \times 10^{-3} \exp(-0.39 \text{ эВ}/T) \text{ см}^2/\text{с}$$

развитие термической неустойчивости маловероятно для разумных температур стенки. Тот же вывод справедлив и для бериллия. Вместе с тем, оно было бы возможно для меньших коэффициентов диффузии. Такое эффективное уменьшение может быть вызвано, например, наличием ловушек с достаточно большой энергией связи с водородом.

В главе «Реакция первой стенки на вспышки ЭЛМов» рассмотрена возможная роль процессов рециклинга в процессе восстановления пьедестала плотности плазмы после вспышки. В начале были выполнены аналитические оценки для случая, когда газовыделение из стенки определяется десорбцией первого порядка. Воздействие ЭЛМов моделируется периодическими колебаниями потока частиц на стенку и соответствующими колебаниями потока тепла из плазмы на стенку, который считается пропорциональным потоку частиц. Изменение температуры стенки находится из одномерного уравнения теплопроводности.

В результате, мы видим, что реакция стенки определяется, в основном, характерной частотой

$$\Omega(t) = \nu \exp(-E_t/T_0(t)) + \Gamma/N_m. \quad (2)$$

где Γ — поток частиц из плазмы на стенку (зависящий от времени), N_m — максимальное накопление водорода в стенке (на единицу площади), $\nu \sim 10^{13} \text{ с}^{-1}$ — характерная частота колебаний атомов. Если изменение потока частиц из плазмы на стенку, вызванное вспышкой ЭЛМа, мало,

$$\frac{\Omega(t)}{|d \ln \Gamma(t)/dt|} \gg 1,$$

поток водорода из стенки в плазму просто равен потоку из плазмы на стенку, и стенка не может играть роли в восстановлении пьедестала. В противоположенном случае

$$\frac{\Omega(t)}{|d \ln \Gamma(t)/dt|} \ll 1, \quad (3)$$

влияния стенки на восстановление пьедестала можно ожидать только когда термодесорбция водорода достаточно эффективна, то есть

$$T_0 \gtrsim T_{min} \equiv \frac{E_t}{\ln(\nu N_m / \Gamma)} \sim 500 \text{ K} \quad (4)$$

(для $E_t = 1.5$ эВ, $N_m = 10^{18}$ см⁻², $\nu = 10^{13}$ с⁻¹ и $\Gamma = 10^{17}$ см⁻²с⁻¹). Эти условия приводят к тому, что существенное влияние десорбции водорода возможно лишь для определенного температурного диапазона, который для указанных параметров лежит в районе 500 – 800 К.

Эти качественные выводы были проверены численным моделированием реакции бериллиевой стенки в коде FACE (автор Р.Д. Смирнов, UCSD), специально модифицированном для решения этой задачи. Взаимодействие водорода со стенкой в этом коде описывается одномерной моделью, учитывающей транспорт растворенного водорода, вакансий и междоузельных атомов бериллия, созданных в результате воздействия на стенку потока плазмы, а также возможные реакции между этими компонентами. Температура стенки вычисляется из решения одномерного уравнения теплопроводности.

На рис. 1 показаны зависимости потока газовой выделения из стенки Γ_{out} от входного потока Γ_{in} от времени для трех различных температур стенки, полученные моделированием (показан один из импульсов). Для каждой температуры рассмотрены два режима: когда стационарная температура определяется излучением (rad) или потоком частиц (flux). Из рисунка видно, что при выбранных параметрах взаимодействия водорода со стенкой можно ожидать существенного

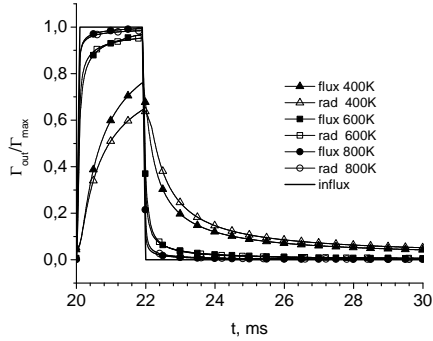


Рис. 1. Зависимости потока газовой выделения из стенки Γ_{out} и входного потока Γ_{in} от времени для трех различных температур стенки в случаях, когда температура контролируется излучением (rad) или потоком частиц (flux). Оба потока нормированны на максимальную величину потока на стенку Γ_{max} .

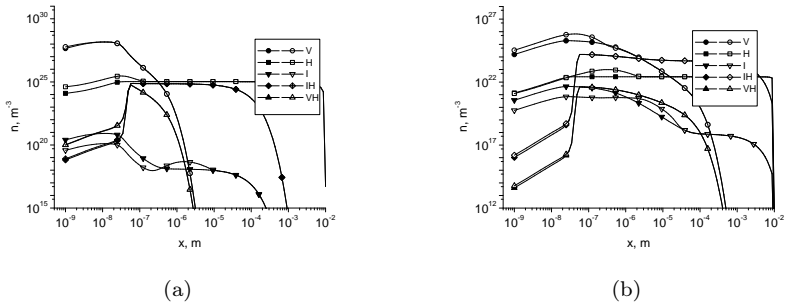


Рис. 2. Распределение по глубине концентраций растворенного водорода H, вакансий V, водорода, захваченного в вакансии VH, междоузельных атомов бериллия I, и междоузельных атомов бериллия, связанных с водородом IH для $\bar{T}_0 = 400$ К (а) и $\bar{T}_0 = 800$ К (б), температура контролируется излучением. Сплошные маркеры соответствуют началу вспышки, пустые – окончанию.

влияния десорбции газа на восстановление пьедестала, только если значение этой температуры мало (около 400 К). При температуре порядка 800 К поток десорбции газа из стенки практически совпадает с потоком водорода из плазмы на стенку, т.е. система находится в квазистационарном режиме, и реакция стенки на вспышку ЭЛМа не может оказывать существенного влияния на восстановление пьедестала.

Анализ изменения профилей распределения частиц по глубине показывает, что газовыделение определяется, в основном, диффузией растворенного водорода (рис. 2, где показано изменение профилей для двух температур 400 К и 800 К; поток на стенку равен $2,64 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, мощность излучения 2 МВт для 400 К и 6 МВт для 800 К).

Для того, чтобы сравнить эти результаты с аналитическими оценками, нужно модифицировать выражение для Ω с учетом того, что в нашем случае газовыделение контролируется диффузией, т.е. является существенно одномерным процессом. В результате видим, что при большой температуре $\Omega \ll 1$, десорбция происходит очень быстро и существенного отличия потока десорбции из стенки от входного потока не может быть.

В главе «Проницаемость водорода через многослойные мембраны» получены некоторые общие закономерности проницаемости водорода через многослойные материалы из газа.

Для стационарного режима проницаемости задача проницаемости может быть решена до конца, с учетом как поверхностных, так и диффузионных процессов. В результате мы находим, что выделяются два предельных режима проницаемости, отличающиеся по величине безразмерного параметра V :

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_n} \quad (5)$$

где V_1 и V_2 — параметры проницаемости входной и выходной сторон,

равные:

$$V_1 = 2K_{a1}\sqrt{P}\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{D_i S_i} \quad (6)$$

и

$$V_n = 2K_{an}\sqrt{P}\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{D_i S_i}. \quad (7)$$

Здесь P — давление газа, D_i , S_i , l_i — коэффициенты диффузии, растворимости и толщины слоя i , K_{a1} и K_{an} — коэффициенты абсорбции на входной и выходной сторонах. Для случая $n = 1$ параметры V_1 и V_n сводятся к известным параметрам проницаемости через несимметричную однослойную мембрану.

Если параметр $V \gg 1$, проницаемость водорода ограничена диффузией в слоях мембраны, а поверхностные процессы не играют роли (DLR режим). Если же $V \ll 1$, поверхностные процессы доминируют (SLR режим).

На практике большое значение имеет зависимость проникающего потока через мембрану от температуры. Анализ уравнений проницаемости показывает, что эта зависимость во многом определяется соотношением между «энергиями активации транспорта» $E_p = E_d + Q_s$ в различных слоях, где E_d — энергия активации диффузии, а Q_s — теплота растворимости. Выделяются следующие случаи:

1. если все $E_p > 0$, то проникающий поток J_p является возрастающей функцией температуры;
2. если все $E_p < 0$, то $J_p(T)$ имеет максимум при температуре, когда $V = 1$;
3. если некоторые из E_p положительны, а некоторые отрицательны и выполняется условие

$$\sum_i \frac{l_i}{D_{0i} S_{0i}} E_{pi} < 0 \quad (8)$$

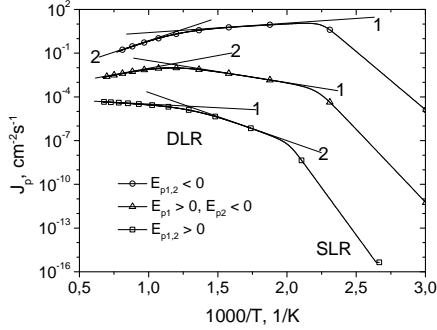


Рис. 3. Зависимости проникающего потока через двухслойную мембрану от температуры для различных энергий активации транспорта E_p . Квадратные маркеры: $E_{p1} = 0.1$ эВ, $E_{p2} = 0.7$ эВ. Треугольные маркеры: $E_{p1} = 0.3$ эВ, $E_{p2} = -0.4$ эВ. Круглые маркеры: $E_{p1} = -0.1$ эВ, $E_{p2} = -0.7$ эВ.

то $J_p(T)$ возрастает. Если же условие (8) не выполнено, $J_p(T)$ имеет максимум.

Эти результаты проиллюстрированы на рис. 3, где показаны возможные зависимости $J_p(T)$ для двухслойной мембраны для различных энергий активации транспорта E_p . Использованные значения E_p указаны в подписи к рисунку. Величины $l_1/D_{01}S_{01} = 10^4$ см⁻², $l_2/D_{02}S_{02} = 1$ см⁻². (Такие параметры выбраны, чтобы сделать иллюстрацию ясной; вместе с тем, они разумны по порядку величины для реальных материалов).

Интересным следствием уравнений для проникающего потока является тот факт, что изменение последовательности любых внутренних слоев не изменяет концентраций на входной и выходной сторонах мембраны и, следовательно, не изменяет проникающего потока. Изменение одного из внешних слоев, однако, может привести к изменению проницаемости (кроме режима DLR, в котором такое изменение также не может ни на что повлиять, так как проницаемость в нем не

зависит от свойств поверхности).

Другой важной величиной является накопление водорода в слоях мембраны. Можно показать, что, хотя изменение последовательности слоев не меняет концентраций на входной и выходной сторонах, накопление при этом может измениться. В общем случае трудно дать какой-либо критерий расположения слоев, приводящий к минимизации накопления. Можно лишь утверждать, что накопление будет меньше, если внутренние слои расположены в порядке возрастания растворимостей.

Указанные закономерности проиллюстрированы на примере мембраны со слоями из меди и вольфрама. В случае мембраны, состоящей только из одного слоя, полученные уравнения и закономерности соответствуют известным результатам для однослойной несимметричной мембраны, неоднократно проверявшимся экспериментально.

В главе «Транспорт водорода в материале с дефектами, имеющими непрерывное распределение по энергиям выхода» рассмотрено влияние распределения ловушек по энергиям связи с водородом на асимптотическую зависимость потока газовой выделения из образца при постоянной температуре $j_{out}(t)$. Так как на достаточно больших временах плотность водорода становится много меньше плотности ловушек, можно использовать для анализа транспорта водорода модель случайных блужданий по решетке с распределением времен ожидания прыжка из узла в узел τ , $P_\tau(\tau)$. Характерное время выхода из ловушки, связанное с температурными флуктуациями, равно $\tau_E = \tau_0 \exp(E/T)$, где τ_0 — характерное время. Поэтому распределение по временам прыжков связано с распределением ловушек по энергиям связи с ними водорода E , $P_E(E/T)$. В наиболее общем виде эту связь можно записать как

$$P_\tau(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^\infty \frac{f(\tau/\tau_E)}{\tau_E} P_E(E) dE,$$

здесь f — функция, удовлетворяющая условиям нормировки и определяющая детали связи $P_\tau(\tau)$ с $P_E(E/T)$. Нетрудно видеть, что конкретный вид функции f не влияет на асимптотику j_{out} . Более того, асимптотика j_{out} будет, в основном, определяться хвостом распределения $P_E(E)$, которое должно достаточно быстро спадать с ростом E . Приведем здесь результаты для случая, когда

$$P_E(E) = 2(1 - p)\delta(E/T) + \alpha p \exp(-\alpha E/T), \quad (9)$$

где p — вероятность встретить ловушку, α — параметр. При выполнении некоторых условий на p , выход водорода из такой системы будет состоять из двух участков, разделенных характерным временем

$$t_p \sim \tau_0/p^{1/(1-\alpha)}.$$

Для $t \ll t_p$ получается закон классической диффузии:

$$j_{out} \sim 1/\sqrt{t}.$$

Для $t \gg t_p$ мы приходим к «аномальной» зависимости,

$$j_{out} \sim 1/t^{(1-\alpha/2)}. \quad (10)$$

Качественно проявление этих двух режимов связано с тем, что для маленьких времен частице нужно сделать мало прыжков, чтобы дойти до поверхности. В результате она почти никогда не попадает в ловушки и ее транспорт определяется, в основном, чистой диффузией. Если же время достаточно большое, транспорт определяется ловушками, что и приводит к аномальной зависимости потока газовой выделение.

Результаты этого пункта проиллюстрированы на рис. 4, где показаны результаты компьютерного моделирования блуждания частицы методом Монте-Карло для случая $p = 10^{-3}$ и $\alpha = 1/3$. На рисунке показана зависимость полного количества частиц $Q(t)$, вышедших к

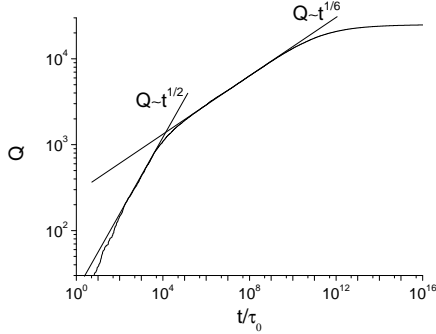


Рис. 4. Зависимость полного количества вышедшего водорода $Q(t)$ от времени.

моменту времени t , от времени. Так как $j_{out} = dQ/dt$, в данном случае получается $j_{out} \sim 1/t^{2/3}$.

Заметим, что такая зависимость потока газовой выделения действительно иногда наблюдается в экспериментах. Так, измерения зависимости потока газовой выделения из стенок от времени в токамаках Tore Supra и JET показывают, что выход водорода происходит по асимптотическому закону $1/t^{0.7} \approx 1/t^{2/3}$ вместо классической диффузионной зависимости $1/t^{0.5}$. Это может быть связано с тем, что значительная доля водорода накапливается в перенаправленных на стенках пленках, имеющих сложную внутреннюю структуру, которая предположительно может быть описана именно наличием дефектов с непрерывным распределением по энергиям выхода водорода.

Таким образом, из модели случайных блужданий мы видим, что непрерывное распределение ловушек по энергиям связи с водородом приводит к качественным изменениям в газовой выделении из образца при постоянной температуре. Для получения количественных результатов такой подход не годится, так как вычисления методом Монте-Карло заняли бы слишком много времени.

Поэтому мы модифицируем уравнения диффузии в поле ловушек, чтобы учесть непрерывное распределение ловушек по энергиям. Изменения сводятся к тому, что теперь вместо различных типов ловушек необходимо ввести функцию распределения ловушек по энергиям выхода $n_E(E, x)$, так что $n_E(E, x) dE$ есть плотность числа частиц, находящихся в ловушках с энергией выхода от E до $E + dE$ (считаем, что энергия захвата $E_{trap} = E_d$ одинакова для всех ловушек). Тогда уравнения, определяющие транспорт частиц в такой системе, запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_s}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 n_s}{\partial x^2} - \frac{\partial}{\partial t} \int_0^\infty n_E dE, \\ \frac{\partial n_E}{\partial t} &= -\nu_d e^{-E/T} n_E + \nu_t n_s \frac{N_E - n_E}{N} \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь N_E — плотность распределения всех ловушек (с водородом и без), введенная аналогично n_E , ν_d и ν_t — характерные частоты выхода и захвата в ловушки, соответственно, D — коэффициент диффузии, n_s — плотность растворенного водорода, N — плотность материала.

В случае малой концентрации водорода большинство ловушек остаются свободными. В этом приближении, считая температуру постоянной, а образец — полубесконечным, можно решить уравнения (11) методом Лапласа. Тогда, подставляя конкретные виды распределения ловушек по энергиям, мы приходим к тем же результатам, что были получены из модели случайных блужданий.

Основные результаты работы

1. В рамках предложенной модели взаимодействия плазмы со стенкой впервые получены условия развития термической неустойчивости, которая предположительно может играть роль в протекании таких процессов как MARFE, срывы и т.п.

2. Впервые выполненные аналитические оценки и численные расчеты показали, что влияние десорбции газа из материалов первой стенки токамаков на восстановление пьедестала после вспышки ЭЛМа возможно только для определенного набора параметров, характеризующих взаимодействие плазмы и стенки, в частности, средней (по времени) температуры поверхности стенки.
3. Впервые выполненные исследования проницаемости и накопления водорода в многослойных материалах с учетом поверхностных процессов показали, что проникающий поток через многослойную мембрану в стационарном режиме при проницаемости из газа не зависит от порядка расположения в ней внутренних слоев, в то время как накопление водорода в той же мембране может существенно измениться даже при перестановке внутренних слоев. Также впервые показано, что при выполнении ряда условий проникающий поток через многослойную мембрану может достигать максимума при определенной температуре.
4. Впервые показано, что непрерывное распределение ловушек по энергиям связи с водородом приводит к ряду качественно новых эффектов в транспорте водорода. В частности, для обезгаживания образца при постоянной температуре асимптотическая зависимость потока газовой выделения от времени отличается от классической диффузионной зависимости $1/\sqrt{t}$.

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 печатных работах. Из них 5 в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

Публикации в журналах из перечня ВАК:

1. E. Marenkov, S. Krashennnikov, A. Pisarev, I. Tsvetkov. On the tokamak first wall response to the ELM bursts. Phys. Plasmas 19,

092501 (2012); doi: 10.1063/1.4742982

2. E. D. Marenkov, S. I. Krasheninnikov, A. Yu. Pigarov, A. A. Pisarev, and I. V. Tsvetkov. On thermal instability caused by plasma-wall coupling. *Phys. Plasmas* 18, 092502 (2011); doi:10.1063/1.3626832 (6 pages)
3. Е.Д. Маренков, С.И. Крашенинников, А.А. Писарев, И.В. Цветков, О термической неустойчивости, вызванной взаимодействием плазмы со стенкой. *Физика плазмы*, 2012, том. 38, №3, с. 1-7
4. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев, Проницаемость изотопов водорода через многослойные мембраны. *Известия РАН. Серия физическая*, 2010, том 74, № 2, с. 316–322
5. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев, Проницаемость изотопов водорода через мембраны с неоднородными по толщине свойствами. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2008, №5, с. 1-5

Прочие публикации:

1. Маренков Е.Д., Крашенинников С.И., Гаспарян Ю.М., Писарев А.А. Транспорт водорода в материалах с широким распределением ловушек по энергиям захвата. Материалы 16 конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». М.: НИЯУ МИФИ, 2013. Сборник тезисов
2. Маренков Е.Д., Смирнов Р.Д., Крашенинников С.И., Писарев А.А. О реакции первой стенки токамаков на ЭЛМ. Материалы 16 конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». М.: НИЯУ МИФИ, 2013. Сборник тезисов

3. E. Marenkov, S. Krasheninnikov, A. Pisarev, I. Tsvetkov. On the tokamak first wall response to the ELM bursts. Book of reports of 20th international conference PSI-2012. Aachen, Germany, 2012
4. E. D. Marenkov, S. I. Krasheninnikov, A. A. Pisarev, and I. V. Tsvetkov. On thermal instability caused by plasma-wall coupling. Book of reports of 20 international conference Ion-Surface Interactions (ISI)-2011, Zvenigorod, Russia, 2011, Vol. 2, p. 275
5. E.D. Marenkov, A.A. Pisarev, I.V. Tsvetkov, Hydrogen permeation through sandwich membranes. Books of reports of 19 international conference IonSurface Interactions ISI-2009, Zvenigorod, Russia. Vol.2, p. 369.
6. E.D. Marenkov, A.A. Pisarev, I.V. Tsvetkov, Hydrogen permeation through the membrane with non uniform properties. Books of reports of 18 international conference IonSurface Interactions ISI-2007, Zvenigorod, Russia. Vol.1, p. 303.
7. E. D. Marenkov, S. I. Krasheninnikov, A. Yu. Pigarov, A. A. Pisarev, and I. V. Tsvetkov. On the thermal instability caused by plasma-wall coupling, тезисы Book of Abstracts of 13th International Workshop on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications and 1st International Conference on Fusion Energy Materials Science, 2011, p. 119 1
8. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев. Транспорт водорода через мембраны с неоднородными по толщине свойствами, Труды восемнадцатой международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью – 2007»
9. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев. Проницаемость водорода через трехслойные структуры, тезисы. Тезисы докладов

Третьей международной конференции «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-2007»

10. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев. Проницаемость водорода через трехслойные структуры, тезисы Труды научной сессии МИФИ-2007 Т.4 Лазерная физика. Физика плазмы. Сверхпроводимость и физика наноструктур №48 13986
11. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев. Проницаемость изотопов водорода через мембраны с неоднородными по толщине свойствами, тезисы учебно-научной конференции-конкурса по физике УНК-2007.
12. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев. Проницаемость водорода через многослойные мембраны, тезисы докладов Четвертой международной конференции «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-2008
13. Е.Д. Маренков, И. В. Цветков, А. А. Писарев. Проницаемость водорода через трехслойные структуры, тезисы Труды Третьей международной конференции «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM-2007
14. А.А. Писарев, И.В.Цветков, Е.Д. Маренков, С.С. Ярко. Проницаемость водорода через металлы. Учебное пособие. М.: МИФИ, 2008. – 144 с.

Подписано в печать

Заказ

Тираж 120 экз.

Типография НИЯУ МИФИ. Каширское шоссе, 31