

УДК 536.468, 546.45

ИНЖЕНЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОКИСЛЕНИЯ СЛОЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ ПЫЛИ В УСЛОВИЯХ АВАРИИ С ИСТЕЧЕНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ИЗ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ В ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ ИТЭР

А.Д. Васильев, К.С. Долганов, А.Е. Киселёв, Л.В. Матвеев, В.Н. Семёнов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), Москва, Россия

Паровое окисление бериллиевой пыли, которая неизбежно будет образовываться и накапливаться в вакуумной камере термоядерного реактора ИТЭР, может происходить в аварийных ситуациях, связанных с поступлением воды из системы охлаждения первой стенки или дивертора в вакуумную камеру (авария типа LOCA). Этот процесс сопровождается выделением свободного водорода, что создаёт опасность пожара или взрыва при смешивании его с воздухом. Анализ безопасности термоядерного реактора должен включать численные оценки степени окисления и количества выделившегося водорода. В работе представлена инженерная модель, позволяющая при заданном содержании пара в объёме камеры определить скорость наработки водорода при окислении слоёв бериллиевой пыли и общее количество образовавшегося при аварии водорода. Проведена аналитическая оценка скорости окисления пылевого слоя.

Ключевые слова: термоядерный реактор, авария с истечением теплоносителя, бериллиевая пыль, аналитическая модель, диффузия пара, кинетика окисления, генерация водорода.

ENGINEERING MODEL OF THE OXIDATION OF A BERYLLIUM DUST LAYER IN AN ACCIDENT WITH THE COOLANT OUTFLOW FROM THE COOLING SYSTEM INTO THE ITER VACUUM CHAMBER

A.D. Vasiliev, K.S. Dolganov, A.E. Kisselev, L.V. Matweev, V.N. Semenov

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Steam oxidation of beryllium dust, which will be inevitably formed and accumulated in the vacuum chamber of the ITER thermonuclear reactor, can occur in accident situations associated with the flow of water from the cooling system of the first wall or divertor into the vacuum chamber (LOCA-type accident). This process is accompanied by the release of free hydrogen, which creates a risk of fire or explosion when it is mixed with air. The safety analysis of a thermonuclear reactor should include numerical estimates of the degree of oxidation and the amount of hydrogen released. The paper presents an engineering model that allows, with a given vapour content in the chamber volume, to determine the rate of hydrogen production during the oxidation of beryllium dust layers and the total amount of hydrogen formed during an accident. An analytical assessment of the oxidation rate of the dust layer was carried out.

Key words: thermonuclear reactor, loss-of-coolant accident, beryllium dust, analytical model, vapour diffusion, oxidation kinetics, hydrogen generation.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-2-37-49

ВВЕДЕНИЕ

В 2021 г. начаты работы по федеральному проекту «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы Российской Федерации «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии». Отдельным мероприятием федерального проекта предусмотрено выполнение НИР «Развитие законодательной и нормативной базы в области использования атомной энергии, включая новые типы ядерных установок, термоядерные и гибридные системы». Принципиальной особенностью этой работы является выработка требований безопасности на основе углублённого рассмотрения вопросов нормальной эксплуатации и нарушений в работе установок и создание методического и расчётного инструментария для подобного анализа.

В рамках федерального проекта планируется сосредоточиться на разработке проектов, а затем и создании нескольких установок, в том числе и токамаков с термоядерными технологиями (ТРТ) [1] и гибридных термоядерных установок (ГТУ) [2]. Отработку методического и расчётного инструментария для термоядерного реактора типа токамак решено проводить на основе проектных и конструкторских решений международного реактора ИТЭР [3].

В настоящей работе рассмотрен вопрос об окислении металлической пыли и генерации водорода в вакуумной камере термоядерного реактора при аварийном поступлении в неё водяного пара.

Первая стенка (ПС) международного термоядерного реактора ИТЭР состоит из отдельных панелей (блоков), поверхность которых, обращённая к плазме, выполнена из бериллия [4]. При работе реактора будет происходить распыление материала первой стенки и накопление пыли в вакуумной камере (ВК) [5—9].

К этим процессам приводит испарение материалов под действием потока энергии из плазмы как при нормальной эксплуатации, так и при отклонениях от нормального режима. К последним относятся режим с краевой локализацией, срывы плазмы, образование электронных потоков, направленных на ПС, и вертикальные смещения плазменного шнура [5, 7].

Образующаяся бериллиевая пыль осаждается и накапливается на поверхностях панелей ПС и в зазорах между ними [10]. При работе установки пыль в этих слоях может быть сильно нагрета, причём даже сильнее, чем собственно подложка, т.е. поверхность ПС [10, 11]. При этом общая площадь поверхности частиц пыли может быть сопоставима с площадью поверхности ПС.

В аварийных ситуациях, связанных с течами воды из системы охлаждения ПС или дивертора в вакуумную камеру (аварии типа LOCA), поступающий в ВК пар вступает в экзотермическую реакцию с горячими металлическими поверхностями и пылью, которая сопровождается образованием водорода. Это создаёт опасность взрыва водородовоздушной смеси при выходе водорода за пределы ВК или при поступлении воздуха внутрь ВК. Процессы окисления бериллия, генерации водорода, образования взрывоопасных смесей в ВК и последствия их возможного горения подробно обсуждаются в [12—15].

Опасность представляет также возможность горения металлических пылевых частиц в атмосфере воздуха или водородопаровоздушной смеси. Различные аспекты горения металлической пыли, включая образование оксидных корок, рассмотрены в [16—18]. В [10, 11] представлена модель окисления бериллиевой пыли в слоях на поверхности ПС или в зазорах между блоками ПС.

Эксперименты по окислению бериллиевых пылевых частиц в слоях на плоской поверхности, в щелях разной геометрии представлены в работах [19, 20]. Экспериментальные данные из этих работ могут быть использованы для верификации предлагаемой инженерной модели.

Анализ безопасности термоядерных установок (ТЯУ) требует численных оценок количества, скорости наработки водорода и состава газовой атмосферы, возникающей при окислении металлических поверхностей, в том числе частиц в пылевых слоях в результате прорыва воды из системы охлаждения в ВК.

В настоящей статье представлена упрощённая математическая модель для описания процесса окисления накопленной в слоях бериллиевой пыли. В её основе лежит предположение, что лимитирующим процессом при окислении является диффузия окислителя (пара) в пористом пылевом слое. В отличие от модели, описанной в [10, 11], в представленной модели для определения скорости окисления пылевого слоя используются реалистичные тепловое и диффузионное граничные условия на границе слоя с атмосферой. Другим отличием является то, что в настоящей модели рассчитываются скорость распространения и температура зоны реакции, что позволяет корректно оценить скорость, степень окисления, количество водорода. Кроме того, в данной модели учитывается, что при низкой концентрации газовой среды на границе слоя диффузия в нём имеет не молекулярный, а капиллярный характер.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ

При разработке модели использованы следующие предположения:

- окисление пыли в слое происходит в условиях, когда скорость поступления пара в ВК при её разгерметизации не настолько велика, чтобы вызывать подъём пыли с поверхности и образование пылевой взвеси в объёме ВК;

- ввиду отвода тепла от стенки к воде в системе охлаждения и слабого теплового контакта со слоем пыли в вакууме при работе реактора в нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) бериллиевая пыль на поверхностях ПС оказывается нагретой вследствие излучения плазмы сильнее, чем сама стенка (подложка) [10];

- окислитель (водяной пар) проникает внутрь слоя пыли за счёт диффузии пара в пароводородной среде внутри пористого слоя (водород — продукт реакции);

- начальная температура слоя достаточно велика, так что характерное время химической реакции много меньше характерного времени диффузии на глубину слоя;

— в отношении продуктов окисления бериллия предполагается, что какая-то их часть α остаётся в виде пористого слоя твёрдого оксида BeO. Объём такого слоя, образованного из 1 м³ исходного пылевого слоя, есть $\psi = \alpha \frac{\Omega_{\text{BeO}}}{\Omega_{\text{Be}}} \frac{1 - \mu_{\text{BeO}}}{1 - \mu_{\text{Be}}}$, где Ω_{BeO} , Ω_{Be} — удельные объёмы, м³/моль, твёрдых (без пор) BeO и Be;

μ_{BeO} , μ_{Be} — пористости соответственно окисленного и неокисленного слоёв. Окисление металлического бериллия будет приводить к росту толщины слоя пыли в ходе окисления вследствие различия молярных объёмов Be и BeO. Величины α , μ_{BeO} , μ_{Be} в настоящей модели могут быть заданы пользователем произвольно. Они могут быть уточнены при появлении новых экспериментальных данных.

КАЧЕСТВЕННОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ

С появлением пара на границе пылевого слоя реакция будет происходить вначале только в узкой приповерхностной зоне, ширина которой δ определяется расстоянием, на которое продиффундирует пар за время реакции t_R : $\delta \sim \sqrt{Dt_R}$ (D — коэффициент диффузии). Эта ширина по условию много меньше толщины пылевого слоя Δ .

По мере окисления бериллия в этом слое реакция будет переходить в следующий слой, так что между поверхностью слоя и зоной горения возникнет постепенно расширяющаяся область окисленного бериллия. Поступление окислителя (пара) к зоне горения, а также обратный поток продукта реакции (водорода) происходят путём диффузии через область окисленного бериллия. Между зоной горения и подложкой находится область, заполненная водородом. Тепло из зоны горения может отводиться через эту область к подложке, а также через область окисленного бериллия во внешнюю атмосферу.

Характерные профили распределения концентрации пара и водорода [моль/м³], а также температура внутри пылевого слоя и в прилегающем к нему пограничном слое атмосферы схематично показаны на рис. 1.

В обозначениях концентрации на рис. 1 и в тексте индекс «v» относится к пару, индекс «h» — к водороду, индекс « Σ » — к суммарной концентрации пара и водорода, индекс «a» — к атмосфере (ядро потока), индекс «s» — к внешней поверхности пылевого слоя, индекс «b» — к внешней границе зоны реакции, индекс «u» — к внутренней границе зоны реакции, индекс «w» — к поверхности подложки.

На рис. 1 использованы следующие обозначения: C_{av} — концентрация пара вдали от ПС «в ядре потока» при температуре T_a ; $C_{s\Sigma}$ — суммарная концентрация пара и водорода на поверхности пылевого слоя при температуре поверхности T_s , при постоянном давлении; C_{sv} и C_{sh} — концентрация пара и водорода соответственно на поверхности слоя; C_{bv} и C_{bh} — то же на границе зоны реакции со стороны внешней границы; $C_{uv} = 0$ и C_{uh} — то же перед зоной реакции; C_{wh} — концентрация водорода на поверхности подложки; T_b — температура в зоне реакции (считаем, что в этой зоне она постоянна); T_w — температура на поверхности подложки; Δ_a — ширина атмосферного пограничного слоя; δ — ширина зоны реакции; X — ширина окисленного слоя пыли; ширина слоя пыли равна Δ .

Задача, таким образом, сводится к определению скорости продвижения зоны реакции вглубь слоя и эволюции температуры в зоне горения T_b и на поверхности слоя T_s при заданной скорости роста концентрации пара в ВК. Тем самым могут быть определены время полного окисления слоя бериллиевой пыли либо время остановки реакции из-за охлаждения более холодной подложкой. При этом определяется полное количество выделившегося за это время водорода.

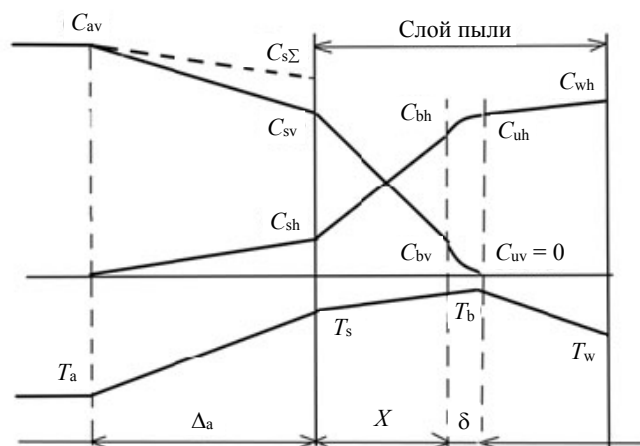


Рис. 1. Схематическое изображение профилей концентрации пара, водорода и температуры в пылевом слое и атмосферном пограничном слое

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Количество молей бериллия в зоне реакции при пористости порядка 0,4—0,5 [10, 11] значительно больше количества молей пара в том же объёме (в $\sim 2 \cdot 10^3$ раза даже при атмосферном давлении пара). Поэтому скорость перемещения фронта реакции во столько же раз меньше характерной скорости диффузионного потока пара в эту зону. Это значит, что профили концентрации в слое являются фактически стационарными и весь процесс движения зоны реакции представляет последовательность стационарных состояний.

В этом случае диффузионный поток пара j [моль $\text{H}_2\text{O}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$] и тепловой поток q [$\text{Вт}/\text{м}^2$] везде, кроме сравнительно узкой зоны реакции, постоянны:

$$\frac{dj}{dx} = 0; \frac{dq}{dx} = 0, \quad (1)$$

где x — координата с положительным направлением вглубь слоя пыли, а в самой зоне реакции

$$\frac{dj}{dx} = R; \frac{dq}{dx} = QR, \quad (2)$$

где R — скорость реакции окисления, моль $\text{H}_2\text{O}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; Q — теплота реакции, Дж/моль H_2O .

В случае прямолинейного канала течения первое из соотношений (2) при малой ширине зоны реакции и постоянстве в ней температуры, давления и коэффициента диффузии сводится к уравнению диффузии [10, 11]

$$D \frac{d^2 C_v}{dx^2} = R = k C_v. \quad (3)$$

Здесь D — бинарный коэффициент диффузии водяного пара в водород, $\text{м}^2/\text{с}$; k — коэффициент скорости реакции, с^{-1} . Уравнение (3) может применяться только в зоне горения, где практически постоянны температура и коэффициент диффузии. В остальной области требуется, в принципе, учитывать непостоянство D и T . Поэтому там проще использовать уравнения (1), (2).

Однако при описании пылевого пористого слоя необходимо заменить в уравнении (3) коэффициент D на эффективный коэффициент диффузии $D_{\text{эф}}$, (см. выражение (14)).

Модель окисления бериллиевой пыли с основным уравнением (3) была разработана специалистами Idaho National Laboratory, США [10]. Примем, что координаты $x = 0$ и $x = \Delta - X$ соответствуют началу зоны окисления и правой границе слоя пыли соответственно. Решением уравнения (3) является

$$C_v = A e^{ax} + B e^{-ax}, \quad a = \sqrt{k/D_{\text{эф}}}, \quad (4)$$

где A и B — константы, определяемые из двух следующих граничных условий (см. Рис. 1):

$$C_v(x=0) = C_{bv}; \quad (5)$$

$$-D_{\text{эф}} \left. \frac{\partial C_v}{\partial x} \right|_{x=0} = k \int_0^{\Delta-X} C_v(x) dx. \quad (6)$$

Соотношение (5) является граничным условием первого рода на левой границе, где задана концентрация водяного пара. Соотношение (6) устанавливает, что диффузионный поток водяного пара на левой границе зоны окисления пыли равен объёмной скорости потребления водяного пара в слое пыли, проинтегрированной по координате x .

Тогда для констант A и B получим

$$A = \frac{C_{bv}}{1 + e^{2a(\Delta-X)}}; \quad B = \frac{C_{bv} e^{2a(\Delta-X)}}{1 + e^{2a(\Delta-X)}}. \quad (7)$$

Профиль молярной концентрации водяного пара в итоге определится следующим соотношением [10]:

$$C_v(x) = C_{bv} \left[\cosh \left(\sqrt{\frac{k}{D_{эф}}} x \right) - \tanh \left(\sqrt{\frac{k}{D_{эф}}} (\Delta - X) \right) \sinh \left(\sqrt{\frac{k}{D_{эф}}} x \right) \right]. \quad (8)$$

Следуя работе [10], в обозначениях уравнения (8) коэффициент скорости реакции

$$k = \frac{s_D \rho_D R_{Be}^{INL}}{c_{H_2O}}, \text{ 1/с}, \quad (9)$$

где s_D — удельная поверхность частицы пыли, $\text{м}^2/\text{кг}$; ρ_D — плотность вещества пыли, $\text{кг}/\text{м}^3$; R_{Be}^{INL} — зависящая от температуры объёмная скорость реакции, полученная на основе экспериментальных данных INL (Idaho National Laboratory, US), моль $\text{H}_2\text{O}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ [10]; ϖ — фактор преобразования от кг Be к молю H_2O , моль/кг; $c_{H_2O} = 27,7$ — молярная концентрация пара в тестах INL, моль/м³.

В итоге результирующая скорость потребления водяного пара M_v на единицу площади поверхности пыли, рассчитываемая как площадь единицы поверхности плоскости, перпендикулярной оси x , моль/(\text{м}^2 \cdot \text{с}), составит:

$$\frac{dM_v}{dt} = -D_{эф} \left. \frac{\partial C_v}{\partial x} \right|_{x=0} = C_{bv} \frac{e^{2a(\Delta-X)} - 1}{e^{2a(\Delta-X)} + 1} \sqrt{k D_{эф}}. \quad (10)$$

Скорость генерации водорода M_h и скорость потребления бериллия M_{Be} при этом можно определить из очевидных соотношений

$$\frac{dM_h}{dt} = \frac{dM_v}{dt} \frac{m_{H_2}}{m_{H_2O}}; \quad \frac{dM_{Be}}{dt} = \frac{dM_v}{dt} \frac{m_{Be}}{m_{H_2O}}, \quad (11)$$

где m_i — молярная масса соответствующего компонента, как следует из реакции окисления



где Q — тепловой эффект реакции.

Выражение для скорости реакции в (3) записано в соответствии с [11] в предположении, что это реакция первого порядка. В настоящей работе коэффициент скорости реакции k также взят из [11], где он представлен на основе полученных INL экспериментальных данных по окислению паром бериллиевых поверхностей. Для конкретного примера пылевого слоя, который использован в настоящей работе (средняя плотность частиц пыли в слое $\rho \approx 1 \text{ г}/\text{см}^3$, пористость слоя $\mu = 0,45$, удельная поверхность пылевых частиц в слое на 1 кг пыли $s_D \approx 1630 \text{ м}^2/\text{кг}$, соответствующая среднему диаметру частицы около 2 мкм), коэффициент k , рассчитанный на основе данных [11], равен

$$k = 7,9 \cdot 10^5 \exp(-13\,465/T) \text{ с}^{-1}, \quad T < 739 \text{ К};$$

$$k = 1,68 \cdot 10^{14} \exp(-28\,789/T) \text{ с}^{-1}, \quad 739 \text{ К} < T < 1133 \text{ К}; \quad (13)$$

$$k = 2,3 \cdot 10^8 \exp(-13\,387/T) \text{ с}^{-1}, \quad T > 1133 \text{ К}.$$

Например, при $T = 1400 \text{ К}$ получим $k = 1,65 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Отметим, что полученная в работе [21] корреляция для скорости окисления бериллиевой пыли в целом неплохо согласуется с корреляцией INL (см. выражения (13)). Тем не менее внимательное изучение полученных в [21] данных показывает, что скорость окисления бериллиевой пыли в зависимости от времени не определяется чисто линейной зависимостью, а носит значительно более сложный характер, явно показывая признаки параболической зависимости, по крайней мере, на малых временах и при относительно невысоких температурах.

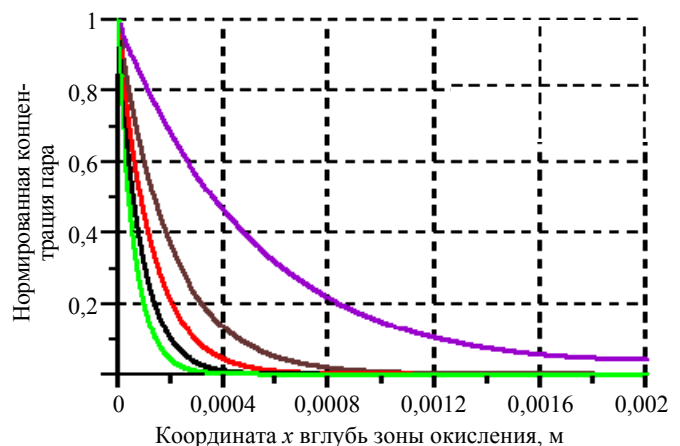


Рис. 2. Профиль концентрации водяного пара в зависимости от координаты, направленной вглубь зоны окисления слоя пыли: — $T = 1073 \text{ К}$; — $T = 1173 \text{ К}$; — $T = 1273 \text{ К}$; — $T = 1373 \text{ К}$; — $T = 1473 \text{ К}$

На рис. 2 показан профиль концентрации водяного пара, нормированной на концентрацию пара на левой границе зоны окисления C_{bv} , вглубь слоя пыли толщиной $\Delta = 2$ мм в зависимости от температуры в соответствии с выражением (8), справедливый для малой толщины окисленного слоя $X \ll \Delta$. Эффективный коэффициент диффузии пара $D_{эф}$ принимался в расчётах для оценки равным постоянной величине 10^{-4} м²/с. Отметим, что $D_{эф}$ растёт с ростом температуры степенным образом с показателем степени при температуре между единицей и двойкой, что значительно меньше роста коэффициента скорости реакции k с ростом T .

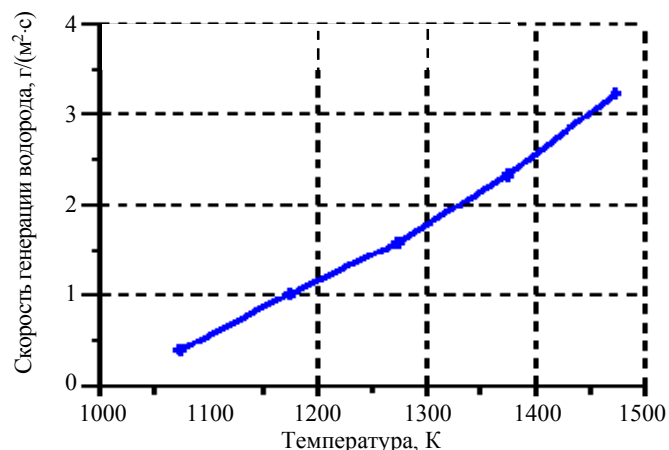


Рис. 3. Зависимость скорости генерации водорода с единицы площади пылевого слоя от температуры

пыли с пористостью 0,45 и толщиной 2 мм составит около 450 г/м². Поэтому время, требуемое для полного окисления пыли, варьируется для рассмотренных температур в диапазоне 140—1250 с.

Чем больше скорость окисления и чем меньше эффективный коэффициент диффузии пара в смеси пар—водород, тем более крутой профиль спада концентрации в зоне окисления (зоне горения) и тем менее широкая зона реакции.

Зависимость скорости генерации водорода с 1 м² пылевого слоя от температуры в зоне реакции показана на Рис. 3. Концентрация пара на левой границе зоны окисления принималась равной 1 моль/м³. Видно, что характерная скорость генерации для наиболее интересного диапазона температуры до начала плавления бериллия составляет порядка 1—3 г/(м²·с). Отметим, что интегральная наработка водорода при полном окислении слоя

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ ПРИ НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКИСЛИТЕЛЯ

При оценке диффузионных потоков в пористой среде необходимо использовать эффективный коэффициент диффузии [10, 11]

$$D_{эф} = D\mu\phi, \quad (14)$$

где D — коэффициент диффузии в свободном пространстве; μ — пористость; ϕ — понижающий коэффициент, учитывающий увеличение пути диффузии из-за его извилистости. Оба этих параметра несколько понижают величину эффективного коэффициента диффузии по сравнению с бинарным коэффициентом диффузии в смеси пар—водород.

При поступлении пара в ВК, особенно с малыми скоростями, в течение длительного времени имеет место ситуация, когда длина свободного пробега λ молекул пара и водорода в пароводородной смеси оказывается больше размера пор r в пылевом слое. В этом случае характер диффузии газов в пористой среде существенно отличается от молекулярного. Пар диффундирует независимо от водорода с коэффициентом диффузии порядка $D_c \approx \frac{1}{3}V_T r$ (V_T — тепловая скорость молекул пара).

То же самое касается и коэффициентов теплопроводности κ и температуропроводности χ , причём $\chi \sim D_c$. В общем случае коэффициенты переноса должны вычисляться с помощью интерполяции между молекулярным и «капиллярным» выражениями.

Следует отметить ещё одну особенность теплопередачи в пылевом слое. Хотя теплопроводность как бериллия [22], так и оксида бериллия [23] много выше теплопроводности газа, тепло переносится, по существу, газовой фазой, поскольку контактная передача тепла между пылинками мала из-за отсутствия сжимающих нагрузок и радиационная теплопроводность также мала [11]. Действительно, пылевой слой можно грубо представить как систему $N \approx \Delta/r \approx 10^3$ поверхностей, между которыми происходит переизлучение, и коэффициент лучистой теплопроводности такой системы порядка $\kappa_R \sim 4\sigma\epsilon T^3/N \sim 1,2 \cdot 10^{-3}$ Вт/м/К $\ll \kappa_{gas}$. Однако в присутствии газа хорошо проводящие твёрдые частицы существенно усиливают теплопередачу по сравнению с собственной теплопроводностью газа. В [11] дано выражение для общей теплопроводности слоя пыли с наполняющим его газом с учётом вклада высокой теплопроводности твёрдых частиц:

$$\kappa = \Lambda \kappa_0, \quad (15)$$

где κ_0 — теплопроводность газа вне пористой среды при тех же условиях; Λ — поправочный коэффициент, связанный с вкладом в теплопередачу твёрдых частиц и зависящий от пористости и отношения теплопроводностей фаз [11]. При использованных для оценок параметрах пылевого слоя в соответствии с [11] для металлического слоя фактор $\Lambda_1 \approx 6,9$, а для оксидного $\Lambda_2 \approx 6,3$.

УПРОЩЁННАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

В бинарной смеси пар—водород диффузионный поток, строго говоря, зависит от градиента температуры, а тепловой поток — от градиента концентрации [24]. Вклад «перекрёстных членов» в рассматриваемых условиях ($T \sim 273—2000$ К, мольная доля компонентов $\sim 0—1$) не превышает 30—40%. В то же время в задаче есть существенные неопределённости, связанные с распределением размеров частиц пылевого слоя, характером диффузии газов в пористой среде слоя в разных режимах, скорости окисления пылинок. Поэтому учёт этих членов был бы превышением точности рассматриваемой модели. Разумным представляется упрощённый подход, при котором производные в уравнениях диффузии и теплопроводности без учёта перекрёстных членов заменяются алгебраическими разностными соотношениями с усреднёнными коэффициентами.

Определение концентрации пара. При таком подходе, например, диффузионный поток пара к зоне реакции (см. рис. 1) в случае $\lambda \ll r$ в соответствии с [23] может быть приближенно выражен как

$$j = j_{sb} = (DC_\Sigma)_{sb} \frac{c_{sv} - c_{bv}}{X} = \frac{(DC_\Sigma)_{sb}}{XC_{s\Sigma}} \left(C_{sv} - C_{bv} \frac{T_b}{T_s} \right) \text{ (моль/(м}^2 \cdot \text{с))}, \quad (16)$$

где C_Σ — суммарная концентрация компонентов; $c_{sv} = C_{sv}/C_\Sigma$, $c_{bv} = C_{bv}/C_\Sigma$ — относительные концентрации (мольные доли); D — коэффициент диффузии; $(DC_\Sigma)_{sb}$ — среднее значение произведения на участке $0 < x < X$, равное $0,5(D_s(C_{sv} + C_{sh}) + D_b(C_{bv} + C_{bh}))$ (здесь и в дальнейшем двойными индексами «as» обозначаются средние значения величин во внешней атмосфере; «sb» — между внешней поверхностью слоя и зоной реакции; «bw» — между зоной реакции и поверхностью подложки). Величина бинарного коэффициента диффузии пар—водород слабо зависит от состава смеси [25]. В противоположном случае кнудсеновского течения $\lambda \gg r$

$$j = j_{sb} = D_{av} \frac{C_{sv} - C_{bv}}{X}, \quad (17)$$

где $D_{av} = 0,5(D_s + D_b)$. В общем случае поток определяется интерполяцией предельных выражений.

Так же может быть представлен диффузионный поток через атмосферный пограничный слой:

$$j = j_{as} = (DC_\Sigma)_{as} \frac{c_{av} - c_{sv}}{\Delta_a} = \frac{(DC_\Sigma)_{as}}{\Delta_a C_{s\Sigma}} (C_{s\Sigma} - C_{sv}) \text{ (моль/(м}^2 \cdot \text{с))}, \quad (18)$$

где учтено, что $c_{av} = 1$; $(DC_\Sigma)_{as}$ — среднее значение произведения DC_Σ во внешнем пограничном слое. Это произведение зависит только от температуры приблизительно как $T^{0,75}$ и не зависит от концентрации [24], поэтому может быть представлено как

$$(DC_\Sigma)_{as} = D_s C_{s\Sigma} \vartheta, \quad \vartheta = \frac{1}{2} \left(1 + \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^{0,75} \right) \approx 0,65 \text{ (при } T_s = 1400 \text{ К, } T_a = 273 \text{ К)}. \quad (19)$$

Из уравнения (3) следует, что ширина зоны реакции порядка $\delta \approx (D/k)^{1/2}$ (см. Рис. 2), а диффузионный поток пара к этой зоне есть

$$j = j_{bu} = (DC_\Sigma)_{bu} \frac{c_{bv} - c_{uv}}{\delta} = \frac{(DC_\Sigma)_{bu}}{C_{s\Sigma}} \frac{C_{bv}}{\delta}, \quad (c_{uv} = 0). \quad (20)$$

С другой стороны, этот же поток в силу квазистационарности равен потоку через окисленную область (см. рис. 1) шириной X и выражается формулой (8). Он также равен потоку через внешний пограничный слой, который выражается аналогичной формулой (18).

Определение температуры. Для определения температуры в разных точках пылевого слоя используются следующие соотношения:

— общий баланс тепловыделения и теплоотвода к границам слоя

$$W = jQ = \kappa_{bw} \frac{T_b - T_w}{\Delta - X} + \kappa_{sb} \frac{T_b - T_s}{X} \quad (\text{Вт/м}^2), \quad (21)$$

где Q — тепловой эффект реакции; κ_{bw} — среднее значение коэффициента теплопроводности на участке между зоной реакции и подложкой; κ_{sb} — средняя теплопроводность между зоной реакции и внешней поверхностью слоя. Первый член в правой части — плотность потока тепла к подложке; второй член — плотность потока тепла к внешней границе слоя;

— условие непрерывности потока тепла на внешней границе пылевого слоя

$$\kappa_{as} \frac{T_s - T_a}{\Delta_a} = \kappa_{sb} \frac{T_b - T_s}{X}, \quad (22)$$

где κ_{as} — среднее значение коэффициента теплопроводности во внешнем пограничном слое.

Скорость перемещения зоны реакции. Скорость перемещения зоны реакции может быть оценена следующим образом. При продвижении фронта реакции на расстояние dZ за время dt произойдёт окисление $C_{Be} dZ$ молей Ве на 1 м^2 поверхности слоя (C_{Be} — средняя мольная плотность бериллия в пылевом слое). Количество окисленных молей Ве (на 1 м^2) равно jdt (окисление 1 моля Ве требует 1 моля пара), а увеличение толщины окисленного слоя $dX = \psi dZ$. Таким образом:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{j}{C_{Be}}; \quad \frac{dX}{dt} = \psi \frac{dZ}{dt}. \quad (23)$$

К приведённым уравнениям (16), (18), (20)—(23) нужно добавить ещё условие отсутствия градиента давления, из которого, в частности, следует равенство $C_{av}T_a = C_{s\Sigma}T_s$. Это условие и шесть перечисленных уравнений представляют систему для определения семи неизвестных C_{sv} , C_{bv} , $C_{s\Sigma}$, j , T_b , T_s , X при заданных $C_{av}(t)$, T_a , T_w , Δ , Δ_a . Ширина пограничного слоя атмосферы Δ_a зависит от гидродинамических условий на поверхности слоя и в разных случаях может быть задана в качестве входного параметра. После этого данная модель на основе решения указанной системы уравнений позволяет получить значения всех переменных как функций времени, в частности, скорость и время полного окисления слоя.

Предложенная модель (уравнения (16), (18), (20)—(23)) может, в принципе, описывать процесс окисления не только бериллия, но и других материалов. Для настройки на требуемый материал необходимо задание скорости реакции в зависимости от температуры, концентрации пара, а также характеристик пылевого слоя: пористость, размеры частиц, объём продуктов реакции и др. Модель применима для расчёта окисления различных марок бериллия как отечественного, так и зарубежного производства. В этом смысле разработанная модель является универсальной. Отметим также, что ожидается относительно небольшое отличие основных параметров, относящихся к окислению, для различных марок бериллия, о чём упоминалось ранее.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА СКОРОСТИ ОКИСЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЫЛЕВОМ СЛОЕ

Предполагая, что скорость собственно химической реакции окисления бериллия описывается уравнениями (3), (13) [10, 11], оценим характерное время окисления бериллия в пылевом слое для конкретного случая.

В качестве примера используем параметры пылевого слоя, рассмотренные в [11]: толщина слоя $\Delta = 2 \text{ мм}$; средний размер частиц пыли $r = 2 \text{ мкм}$; средняя плотность $\rho = 1 \text{ г/см}^3$; пористость $\mu = 0,45$; коэффициент уменьшения скорости диффузии из-за увеличения пути диффузии за счёт извилистости $\phi = 0,5$; удельная поверхность пылевых частиц в слое на 1 кг пыли $s_D = 1630 \text{ м}^2/\text{кг}$; начальная температура на поверхности слоя $T_s = 1400 \text{ К}$; температура поверхности подложки $T_w = 500\text{—}1000 \text{ К}$. Численные оценки далее сделаны в предположении, что пористости и извилистости окисленного и неокисленного слоёв равны (μ и ϕ), а величина $\psi \sim 1$.

Процесс окисления сильно зависит от размера течи и от геометрии ВК, определяющих скорость роста давления пара и условия тепло- и массопереноса на поверхности пыли. Для оценок будем считать объём вакуумной камеры ИТЭР $\Omega = 1727 \text{ м}^3$, площадь сечения ВК, нормального к тороидальной оси, $S \approx 50 \text{ м}^2$.

Рассмотрим аварийную ситуацию с большой течью теплоносителя из системы охлаждения в ВК, когда площадь разрыва в системе составляет $0,1 \text{ м}^2$. Расход пароводяной смеси, оцененный по модели двухфазного критического истечения [26], составляет $J = 9,4 \cdot 10^3 \text{ моль/с}$, скорость роста концентрации пара в объёме Ω ВК $\dot{C}_{av} = J/\Omega = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ в предположении, что капли воды мгновенно испаряются. Предполагается, что рассматриваемый пылевой слой находится на расстоянии $L = 10 \text{ м}$ в направлении тороидальной оси от места течи. Он представляет собой малый участок гладкой плоской поверхности, обтекаемой потоком газа со скоростью V .

Параметры парового потока вблизи поверхности пылевого слоя. Рассмотрим гидродинамические условия на внешней границе пылевого слоя. Пар из течи распространяется, заполняя камеру вдоль тороидальной оси по обе стороны от места разрыва. Скорость течения пара может быть оценена как $V(t) \approx \frac{1}{2} \frac{J}{SC_{av}(t)}$, где S — площадь сечения ВК, нормального тороидальной оси; множитель $1/2$ использован для учёта того, что поток пара равномерно расходится вдоль оси в обе стороны от течи. Эта скорость снижается со временем из-за увеличения концентрации пара в камере.

Локальное число Рейнольдса потока равно $Re = VL/v$ (v — вязкость пара при концентрации $C(t)$ и температуре T_a). По числу Рейнольдса может быть определено локальное сопротивление ξ из соотношения [27, 28]

$$\sqrt{\frac{0,34}{\xi}} = \ln(\xi Re), \quad (24)$$

после чего определяются динамическая скорость $u^* = V(\xi/2)^{1/2}$, толщина вязкого подслоя $\Delta_v \approx 10v/u^*$ и полная толщина турбулентного пограничного слоя $\Delta_T \approx 0,3L(\xi)^{1/2}$ [27, 28].

В соответствии с [28] диффузионный поток (в данном случае поток пара в пароводородной смеси) через турбулентный пограничный слой может быть оценен как чисто молекулярный поток через некоторый слой с эффективной толщиной

$$\Delta_a \approx \Delta_v \left(1 + \frac{\beta}{10\alpha Pr} \ln \left(\frac{\Delta_T}{\Delta_v} \right) \right), \quad (25)$$

где $Pr = \nu/D$ — диффузионное число Прандтля; $\alpha = 0,4$ — постоянная Кармана; β — эмпирическая константа.

Отметим, что число Рейнольдса не зависит в данном случае от времени, так как и скорость V , и кинематическая вязкость газа ν обратно пропорциональны его концентрации. Вместе с Re ширина диффузионного пограничного слоя Δ_T , а также Δ_v и Δ_a не зависят от времени при увеличении концентрации пара.

Оценка скорости реакции. Проведём оценку параметров пограничного слоя газовой атмосферы. Число Рейнольдса для потока пара, заполняющего ВК, приблизительно равно $Re \approx 1,8 \cdot 10^6$. Коэффициент сопротивления в этом случае порядка $\xi \approx 0,004$, толщина вязкого подслоя $\Delta_v \sim 1,3 \text{ мм}$, полная толщина турбулентного пограничного слоя порядка $\Delta_T \sim 0,18 \text{ м}$. Эффективная ширина турбулентного диффузионного пограничного слоя, рассчитанная по (25), составляет $\Delta_a \sim 3 \text{ мм}$. Диффузионное число Прандтля ($Pr \approx 0,87$), входящее в (25), оценено для пароводородной смеси с равными мольными долями при температуре $T \approx 850 \text{ К}$, средней между температурой в ядре потока и начальной температурой вблизи поверхности слоя пыли.

Характерное время окисления, как будет показано, много больше времени наполнения камеры вплоть до атмосферного давления (несколько секунд), так что процесс окисления будет проходить, в основном, в молекулярном режиме.

Из условия непрерывности потока тепла на внешней границе слоя (22) следует

$$T_b - T_s = \frac{X}{\Delta_a} \frac{\kappa_{as}}{\kappa_{sb}} (T_s - T_a). \quad (26)$$

Коэффициент теплопроводности зависит только от температуры приблизительно как $T^{0,75}$ [24], поэтому среднее значение κ_{as} аналогично (19) можно выразить как $\kappa_{as} = \kappa_s \vartheta$, где ϑ определяется из (19). Коэффициент κ_{sb} внутри слоя согласно (15) есть $\kappa_{sb} = \kappa_s \Lambda_2$, так что $\kappa_{as}/\kappa_{sb} = \vartheta/\Lambda_2 \ll 1$, и при $X < \Delta_a$ ($T_b - T_s \ll (T_s - T_a)$). Поэтому можно считать, что $T_s \approx T_b$.

Из условия равенства диффузионных потоков по разные стороны границы зоны реакции, выражающихся формулами (16) и (20), получаем

$$\frac{(D C_\Sigma)_{sb}}{C_{s\Sigma}} \frac{C_{sv} - C_{bv}}{X} = \frac{(D C_\Sigma)_{bu}}{C_{s\Sigma}} \frac{C_{bv}}{\delta}, \quad (27)$$

откуда $C_{bv} = C_{sv} \frac{\delta}{X + \delta}$; $C_{sv} - C_{bv} = C_{sv} \frac{X}{X + \delta}$. Здесь учтено, что во всей области ($0 < x < X + \delta$) концентрация C_Σ и коэффициент диффузии $D = D_{sb}$ постоянны в силу постоянства давления и температуры ($T_s \approx T_b$) в этой области и предположенного равенства пористости в окисленной и неокисленной частях. При $T = 1400$ К коэффициент диффузии с учётом пористости и извилистости $\mu\phi \approx 0,2$ $D_{sb} \approx 2,4 \cdot 10^{-4}$ м²/с, скорость реакции согласно (13) $k \approx 1,6 \cdot 10^4$ с⁻¹, а $\delta = (\mu\phi D_{sb}/k)^{1/2} \approx 0,12$ мм.

Поскольку $\delta \ll \Delta$, а $X \sim \Delta$ в течение большей части времени движения зоны реакции, то для оценки полного времени окисления слоя будем считать, что $\delta \ll X$ и $C_{bv} \ll C_{sv}$, а

$$C_{sv} - C_{bv} \approx C_{sv}. \quad (28)$$

Из условия непрерывности диффузионного потока пара на границе пылевого слоя с атмосферой, приравнявая (18) и (16), получаем

$$(C_{s\Sigma} - C_{sv}) \approx C_{sv} \frac{\Delta_a}{X} \frac{(D C_\Sigma)_{sb}}{(D C_\Sigma)_{as}} = C_{sv} \frac{\Delta_a}{X} \frac{D_{sb}}{D_s} = \frac{\mu\phi}{\vartheta} C_{sv} \frac{\Delta_a}{X}. \quad (29)$$

Здесь учтено соотношение (19), а также то, что при отсутствии градиента давления и температуры ($T_s \approx T_b$) D_{sb} и C_Σ постоянны при $x < X + \delta$. При этом $D_{sb}/D_s = \mu\phi \approx 0,2$. Как следует из (29):

$$C_{sv} = \frac{C_{s\Sigma}}{1 + \frac{\Delta_a \mu\phi}{X \vartheta}}. \quad (30)$$

Скорость перемещения зоны горения находим из (23), а поток пара через внешнюю границу пылевого слоя находим из (16) с учётом (28) и (30). В результате получаем

$$\frac{dX}{dt} \approx \frac{D_{sb}}{X} \frac{C_{sv}}{C_{Be}} = \frac{D_{sb}}{X \left(1 + \frac{\Delta_a \mu\phi}{X \vartheta} \right)} \frac{C_{s\Sigma}}{C_{Be}}. \quad (31)$$

Входящее в (31) произведение $D_{sb} C_{s\Sigma}$, где D_{sb} — молекулярный коэффициент диффузии, поправленный на пористость и извилистость, не зависит от концентрации $C_{s\Sigma}$ и, следовательно, не зависит от времени при росте концентрации во время натекания. Это произведение может быть вычислено при любой концентрации, например, 1 моль/м³ и при температуре T_s . Интегрируя уравнение (31) и приравнявая $X = \Delta$, получаем

$$\left(X + \frac{\mu\phi}{\vartheta} \Delta_a \right)^2 - \left(\frac{\mu\phi}{\vartheta} \Delta_a \right)^2 = \frac{D_{sb}}{X} \frac{C_{s\Sigma}}{C_{Be}} t; \quad t = \frac{\Delta^2 + 2 \frac{\mu\phi}{\vartheta} \Delta \Delta_a C_{Be}}{D_{sb} C_{s\Sigma}}. \quad (32)$$

Подставляя значения параметров в (32), получим $t \approx 465$ с. Это время значительно больше времени заполнения ВК вплоть до давления $\sim 2,5$ атм., соответствующего моменту разрыва предохранительной мембраны вакуумной камеры (~ 17 с). Скорость окисления будет соответствовать (31) и после этого момента, пока течь не прекратится. После прекращения течи гидродинамические условия, определяющие

ширину атмосферных пограничных слоёв на поверхности пыли, будут задаваться конвективными течениями в ВК.

Температура в зоне реакции. При оценке скорости распространения реакции окисления исходим из предположения, что температура в зоне реакции T_b достаточно велика, так что выполняется условие $\delta \sim (D/k)^{1/2} \ll \Delta$. Коэффициенты диффузии и концентрации пара рассчитывались для $T_b \approx 1400$ К. Необходимо проверить, в каких условиях выполняются эти предположения. Как будет видно дальше, такая температура слоя будет поддерживаться в начале процесса окисления при температуре подложки $T_w \geq 1000$ К.

Температура в зоне реакции определяется балансом тепловыделения в зоне реакции и охлаждения за счёт теплоотвода к подложке. В уравнении (10) нужно учесть только первый член в правой части (второй член соответствует тепловому потоку на внешнюю границу пылевого слоя, который мал в силу $T_b \approx T_s$). Подставив для входящего в слой потока пара значение j из (18) с учётом (19), получаем

$$jQ = \frac{9D_s C_{s\Sigma}}{\Delta a} Q = \kappa_{bw} \frac{T_b - T_w}{\Delta - X}, \quad (33)$$

где $Q = 3,7 \cdot 10^5$ Дж/моль — тепловой эффект реакции окисления паром на 1 моль бериллия [13] (см. уравнение (12)); κ_{bw} — среднее значение коэффициента теплопроводности между подложкой и зоной реакции $X + \delta < x < \Delta$. Для его оценки нужно учесть, что в этой области находится водород. Коэффициент теплопроводности есть $\kappa = \Lambda_1 \chi C_\Sigma c'_p$, где c'_p — молярная теплоёмкость водорода (Дж/моль/град), χ — его температуропроводность. Произведение χC_Σ не зависит от концентрации и зависит только от температуры приблизительно как $T^{0,75}$ [24]. Поэтому среднее значение коэффициента теплопроводности в указанной области можно получить аналогично (19): $\kappa_{bw} = \Lambda_1 \chi_b C_{b\Sigma} c'_p \vartheta_1$; $\vartheta_1 = 0,5(1 + (T_w/T_b)^{0,75}) \approx 0,9$ (при $T_w = 1000$ К, $T_b = 1400$ К). Кроме того, ввиду постоянства давления и температуры между внешней поверхностью слоя и зоной реакции ($x < X + \delta$) $C_{s\Sigma} = C_{b\Sigma}$. Подставляя это выражение в (33), получаем

$$T_b = T_w + \frac{Q}{c'_p} \frac{\vartheta_1 \Lambda_1}{\Delta_a} \frac{\Delta - X}{\Delta_a}, \quad (34)$$

где введено обозначение $g = D_s/\chi_b \approx 0,43$ (обе величины берутся при одинаковых давлении и температуре $T_s = T_b$). Подставив в (34) значения $Q/c'_p \approx 1,3 \cdot 10^4$ К, $\Lambda_1 \approx 6,9$, $\vartheta \approx 0,65$, $\vartheta_1 \approx 0,9$, получим $T_b \approx 1400$ К при $X \ll \Delta$, что оправдывает сделанное предположение о температуре в начале процесса. При приближении зоны горения к подложке ($X \rightarrow \Delta$) температура в зоне горения, а вместе с ней скорость реакции быстро падают, а ширина зоны реакции δ растёт и в какой-то момент станет $\delta > \Delta$. С этого момента скорость окисления будет меньше, чем следует из (31). Таким образом, оценка времени окисления (32) является заниженной, т.е. консервативной с точки зрения скорости выделения водорода. Фактически скорость наработки водорода будет меньше.

Из (34) видно, что температура реакции будет расти с уменьшением Δ_a , т.е. с улучшением условий притока пара.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена инженерная модель для оценки скорости окисления слоёв бериллиевой пыли, которая будет образовываться и накапливаться при работе термоядерного реактора ИТЭР. Окисление может происходить при взаимодействии пыли с паром в результате аварийного прорыва воды из системы охлаждения в вакуумную камеру (авария LOCA) и сопровождаться выделением водорода, что создаёт опасность взрыва.

Модель основана на предположении, что при высоких температурах пыли скорость окисления ограничивается скоростью притока в зону реакции окислителя (пара) путём диффузии в пористой среде пылевого слоя. Представленная модель позволяет определить скорость наработки и количество водорода при заданной интенсивности истечения воды, которая является входным условием для модели.

Проведена численная оценка скорости и времени полного окисления пыли в слое в предположении о том, что гидродинамические условия на границе слоя неизменны и соответствуют процессу заполнения ка-

меры. Полученное таким образом время окисления оказывается больше времени заполнения вакуумной камеры. Можно показать, что это справедливо и для течей других размеров. При рассмотренных здесь параметрах пылевого слоя (толщина 2 мм, плотность 1 г/см³) его полное окисление будет сопровождаться выделением около 450 г водорода с 1 м² со скоростью $\sim 1\text{--}2$ г/(м²·с) при температуре в зоне горения 1400 К.

Если же течь прекратится, то с этого момента условия на границе слоя изменятся и будут определяться конвективными движениями газовой среды в ВК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красильников А.В. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. — Физика плазмы, 2021, т. 47, вып. 11, с. 970—985.
2. Кутеев Б.В., Шпанский Ю.С. команда DEMO-FNS. Развитие гибридных систем «Синтез—деление» и их интеграция в ядерную энергетику России. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 2, с. 7—14.
3. ITER Organization [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iter.org/>.
4. Aymar R., Barabaschi P., Shimomura Y. The ITER design. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. 519—565.
5. Mazzinia G., Kaliatkab T., Porfiric M.T. Tritium and dust source term inventory evaluation issues in the European DEMO reactor concepts. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 146, p. 510—513.
6. Shimada M., Pitts R.A., Ciattaglia S., Carpentier S., Choi C.H., Dell Orco G., Hirai T., Kukushkin A., Lisgo S., Palmer J., Shu W., Veshchev E. In-vessel dust and tritium control strategy in ITER. — J. of Nuclear Materials, 2013, vol. 438, p. 996—1000.
7. Пашков А.Ю. Оценка срока службы первой стенки ТИН с учётом её взаимодействия с плазмой. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, вып. 2, с. 45—52.
8. García-Cascales J.R., Otón-Martínez R.A., Sánchez-Velasco F.J., Vera-García F., Bentaib A., Meynet N. Advances in the characterisation of reactive gas and solid mixtures under low pressure conditions. — Comput. Fluids, 2014, vol. 101, p. 64—87.
9. Topilski L., Reyes S. Accident Analysis Report Vol. iii: Hypothetical Event Analysis. Technical Report ITER-D-2E2XAMv4.1, ITER Project. France, 2009.
10. Merrill Brad J., Moore Richard L., Sharpe J. Phillip. A preliminary assessment of beryllium dust oxidation during a wet bypass accident in a fusion reactor. — Fusion Engineering and Design, 2009, vol. 84, p. 1285—1288.
11. Moore Richard L. Final Report on ITER Task Agreement 81-08. Idaho National Laboratory Idaho Falls, Idaho 83415, March 2008, INL/EXT-08-13894.
12. Пашков А.Ю. Оценка возможности образования и взрыва гремучей смеси после аварии с истечением воды и прорывом воздуха в вакуумную камеру ДЕМО-ТИН. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 78—91.
13. Сорокин С.И., Давыдов Д.А. Моделирование химического взаимодействия бериллиевой облицовки с водяным паром в замкнутой полости. — Там же, 2004, вып. 1, с. 10—20.
14. Давыдов Д.А., Холопова О.В., Колбасов Б.Н. Образование и деградация оксидных плёнок на бериллии. — Там же, 2010, вып. 2, с. 39—49.
15. Iseli M. In-vessel hydrogen deflagration and detonation in ITER-FEAT. — Fusion Engineering and Design, 2001, vol. 54, p. 421—430.
16. Давыдов Д.А., Холопова О.В., Колбасов Б.Н. Некоторые характеристики воспламенения и горения бериллиевой пыли. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 1, с. 32—41.
17. García-Cascales J.R., Velasco F.J.S., Otón-Martínez R.A., Espín-Tolosa S., Bentaib A., Meynet N., Bleyer A. Characterisation of metal combustion with DUST code. — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 98—99, p. 2142—2146.
18. Nicolás-Pérez Francisco, Velasco F.J.S., Otón-Martínez Ramón A., García-Cascales José R., Bentaib Ahmed Chaumeix Nabih. Mathematical Modelling of turbulent combustion of two-phase mixtures of gas and solid particles with a eulerian-eulerian approach: the case of hydrogen combustion in the presence of graphite particles. — Mathematics, 2021, vol. 9, p. 2017; <https://doi.org/10.3390/math9172017>.
19. Давыдов Д.А., Бирюков А.Ю., Чехлатов Г.М. Химическое взаимодействие бериллиевой пыли в щелях и на плоской поверхности с водяным паром. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2002, вып. 3—4, с. 118—125.
20. Сорокин С.И., Давыдов Д.А. Исследование константы скорости реакции при окислении водяным паром компактного и пористого бериллия и бериллиевого порошка. — Там же, с. 102—117.
21. Ovchinnikov I., Komarov A., Kuznetsov V., Titov V. Real-time measurement of hydrogen generation level during beryllium Dust oxidation by steam depending on the dust arrangement geometry. — Fusion Engineering and Design, 2006, vol. 81, p. 2073—2084.
22. Чиркин В.С. Температуропроводность и теплопроводность металлического бериллия. — Атомная энергия, 1966, т. 20, вып. 1, с. 80—82.
23. Харламов А.Г. Теплопроводность окиси бериллия в интервале температур 1000—2000 °С. — Там же, 1963, т. 15, вып. 6, с. 517—519.
24. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987. 502 с.
25. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. X. Физическая кинетика. — М.: Наука, 1979.
26. Семенов В.Н., Стародубцева Л.П., Соков Л.М. Неравновесная модель истечения теплоносителя через трещины в трубах для обоснования концепции «Течь перед разрушением». — Известия Академии наук. Сер. Энергетика, 2004, № 2, с. 101—107.
27. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. — М.: Наука, 1988.
28. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. — М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 699 с.



Александр Дмитриевич Васильев, с.н.с., к.ф.-м.н., лаборатория теоретической физики; ИБРАЭ РАН, 115191 Москва, Большая Тульская ул. 52, Россия
vasil@ibrae.ac.ru



Кирилл Сергеевич Долганов, к. техн. н., заведующий лабораторией анализа запроектных аварий на АЭС; ИБРАЭ РАН, 115191 Москва, Большая Тульская ул. 52, Россия
dolganov@ibrae.ac.ru



Аркадий Евгеньевич Киселёв, д. техн. н., заведующий отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок; ИБРАЭ РАН, 115191 Москва, Большая Тульская ул. 52, Россия
ksv@ibrae.ac.ru



Леонид Владимирович Матвеев, д.ф.-м.н., директор Института проблем безопасного развития атомной энергетики; ИБРАЭ РАН, 115191 Москва, Большая Тульская ул. 52, Россия
matweev@ibrae.ac.ru



Владимир Николаевич Семёнов, д. техн. н., заместитель заведующего отделением анализа безопасности ядерных энергетических установок; ИБРАЭ РАН, 115191 Москва, Большая Тульская ул. 52, Россия
semenov@ibrae.ac.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2022 г.

После доработки 16 марта 2022 г.

Принята к публикации 25 марта 2022 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, с. 37—49.