

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
БЕРИЛЛИЕВОЙ ОБЛИЦОВКИ С ВОДЯНЫМ ПАРОМ
В ЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ**

С.И. Сорокин, Д.А. Давыдов (ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А.А. Бочвара)

Описан пример расчетного изучения динамических процессов в замкнутой полости при реакции пористого бериллия с водяным паром. Для расчетов была предложена система дифференциальных уравнений. Расчеты проводили для варианта сферической полости с внутренней облицовкой из бериллия. Использовали данные о скорости окисления водяным паром бериллия с пористостью от 6 до 7,65%. На частном примере варианта полости с радиусом $R = 0,1$ м показано влияние ряда параметров на временные зависимости температуры, количество водяного пара и водорода в ее объеме. Предложены результаты расчетов для интервала времени от 0 до 100 с.

SIMULATION OF CHEMICAL INTERACTION BETWEEN STEAM AND BERYLLIUM ARMOR IN CLOSED CAVITY. S.I. SOROKIN, D.A. DAVYDOV. An example of calculation studies of dynamic processes at a reaction of porous beryllium with steam in a closed cavity is described. For the calculations the system of differential equations was offered. The calculations were carried out for a spherical cavity, with internal beryllium facing. The data on the rate of oxidation of beryllium with porosity up to 7.65% by steam were used. The influence of some parameters on time dependences of temperature as well as of steam and hydrogen inventories in a volume is shown as an example for a cavity with radius $R = 0.1$ m. Results of calculations for a time interval from 0 to 100 s are presented.

ВВЕДЕНИЕ

По данным исследований безопасности термоядерного реактора ИТЭР (и, вероятно, безопасности последующих реакторов, имеющих охлаждение первой стенки плазменной камеры водой высоких теплофизических параметров), одна из опасных аварий — прорыв теплоносителя в плазменную камеру реактора, облицованную по физическим требованиям бериллием. Такая авария сопровождается как генерацией водорода, так и увеличением общего давления парогазовой смеси (ПГС). Одной из возможных причин разрушения стенки плазменной камеры может оказаться несоответствие прочностных характеристик ее стенок и давления ПГС. Разрушение первого барьера безопасности — стенки плазменной камеры — угрожает взрывом водорода и выбросом токсичного оксида бериллия в окружающую среду. Изучение такой аварии опытным путем дорого и опасно. Поэтому возможность и необходимость экспериментального моделирования аварии следует предварительно обосновать расчетным путем.

Обычно в опытах при изучении скорости реакции бериллия с водяным паром стремятся поддерживать их условия постоянными как по давлению, так и по температуре.

Аварийный процесс всегда протекает при резко изменяющихся во времени условиях. Поэтому при анализе процесса или его модели рассматривают несколько переменных по величине и протекающих одновременно процессов, влияющих друг на друга: накопления ПГС и изменения ее состава, а также изменения температуры в полости. Учитывают, что:

— под внешним давлением меняется скорость поступления воды через сквозное отверстие в стенке полости из-за возникающего противодействия при формировании ПГС;

— скорость генерации водорода в полости меняется от давления водяного пара и, особенно, от скорости изменения температуры облицовки из бериллия;

— скорость изменения температуры облицовки из бериллия, в свою очередь, зависит от скорости отвода тепла на внешнюю стенку полости, интенсивности экзотермической реакции окисления и темпа роста фоновой температуры — температуры внешней стенки полости, имитирующей результат выделения остаточного тепла при радиоактивном распаде.

Поэтому как величины количеств водорода и водяного пара (и их суммарного давления) в полости, так и значения температуры облицовки из бериллия существенно зависят от времени. Следует отметить, что все зависимости количественно определяются рядом факторов, таких, как коэффициент теплоотдачи между облицовкой и внешней стенкой, размеры сквозного отверстия, теплоемкость материала облицовки и т.п.

В работе предложили математическую модель процессов накопления ПГС и изменений температуры в абстрактной полости, описав их системой дифференциальных и алгебраических уравнений. Расчеты на ее основе позволяют изучить в

первом приближении ряд вариантов аварии, чтобы при необходимости выделить для эксперимента наиболее интересные.

В данной работе на конкретном частном примере изучили динамику процессов, возникающих при поступлении водяного пара в замкнутую полость, используя для расчетов достаточно простую систему дифференциальных уравнений и компьютерную программу для их численного интегрирования.

Прочностные характеристики внешней стенки полости во внимание не принимали, т.е. считали, что стенка в состоянии выдержать любое давление в полости без разрушения. Имели в виду, однако, что с помощью уравнения Клапейрона можно вычислить давление в полости для любого момента по расчетным данным о содержании в полости компонентов ПГС, температуре ПГС и по известным данным об объеме полости.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Начальная стадия аварии с прорывом теплоносителя в плазменную камеру представляется следующим образом. На участке стенки полости, охлаждаемой водяным теплоносителем, образовалось сквозное отверстие, через которое поступает вода. Вода, поступая в камеру в виде пара, вступает в реакцию с нагретой до рабочей температуры облицовкой из бериллия на стенке камеры. В объеме камеры растет давление оттого, что накапливается ПГС, состоящая из водяного пара и водорода. Интенсивность экзотермической реакции определяется температурой облицовки из бериллия и количеством водяного пара в камере. Схематически такая авария показана на рис. 1.

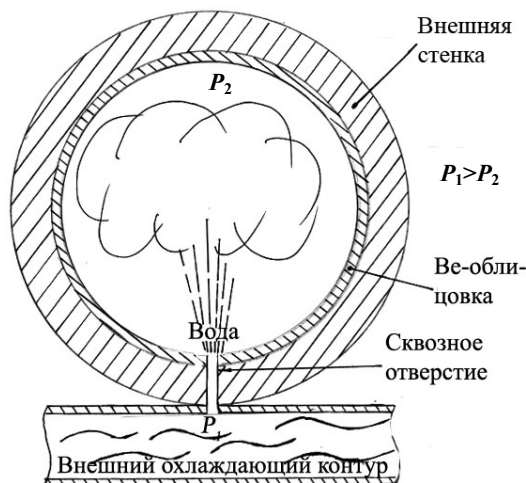


Рис. 1. Схема аварии с попаданием теплоносителя в разогретую камеру с бериллиевой облицовкой

Известно, что энергетические установки с применением ядерных реакций характеризуются остаточным тепловыделением, обусловленным распадом радиоактивных изотопов, накопившихся в конструкционных материалах. Поэтому после останова реактора в случае потери теплоносителя в системе его охлаждения температура стенки плазменной камеры под воздействием остаточного тепловыделения может превысить обычное рабочее значение. В зависимости от теплотехнических характеристик конструкции реактора возрастающая температура достигнет нового

стационарного уровня. Как будет видно из дальнейшего, это обстоятельство способно влиять на интенсивность экзотермической реакции бериллия с водяным паром. Отдаленные периоды времени, когда аварийный реактор охладится до температуры окружающей среды, не представляют интереса, так как реакция окисления бериллия водяным паром в этом случае резко замедляется.

В настоящее время, вероятно, нет достаточно точного описания температурных изменений внутренней поверхности плазменной камеры при аварии, связанной с потерей теплоносителя. Это чрезвычайно сложная теплофизическая задача расчета температурного поля в теле со сложной структурой и при наличии внутренних источников тепла, интенсивность которых определяется постоянной радиоактивного распада (остаточное тепловыделение). Мы предложили до решения этой сложной задачи ограничиться уравнением, обобщающим тепловые изменения в массе термоядерного реактора температурным ходом внешней стенки полости:

$$T = T_0 + \Delta T(1 - \exp(-\gamma\tau)), \quad (1)$$

где T_0 — начальная температура стенки камеры (полости), «контролируемая теплоносителем»; ΔT — максимальный прирост температуры основной части стенки полости, имитирующий ее новое стационарное значение после «потери теплоносителя»; γ — константа времени при экспоненциальном росте температуры; τ — время.

Варьируя значениями «максимального прироста температуры» и константы времени при экспоненциальном росте температуры, можно в первом приближении представить различные типы временных зависимостей температуры внешней стенки полости.

В расчетах использовали данные об окислении водяным паром бериллия (с пористостью от 5 до 7,65%), выраженные температурной зависимостью константы скорости экзотермической реакции, представленной графически в [1] и уравнением [2]:

$$K = \alpha \exp(-\beta/T) = 5,42 \cdot 10^4 \exp(-18\,874/T), \quad (2)$$

где при данных числовых значениях коэффициентов размерность константы скорости реакции K измерена в м/с, а температура T представлена в Кельвинах (К).

Упомянутые процессы представлены уравнениями:

$$\frac{dn_{\text{OX}}}{d\tau} = \frac{Z\rho_{\text{LK}}}{18} P_k - \frac{Z\rho_{\text{LK}}}{18} (n_{\text{OX1}} + n_{\text{MOL1}}) \frac{RT}{V} - K \frac{n_{\text{OX}}}{V} F; \quad (3)$$

$$\frac{dn_{\text{MOL}}}{d\tau} = K \frac{n_{\text{OX}}}{V} F; \quad (4)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = Q \frac{n_{\text{OX}}}{V} \frac{KF}{C_{\text{Be}}\rho_{\text{Be}}\omega} - \Theta \frac{F}{C_{\text{Be}}\rho_{\text{Be}}\omega} \{T_1 - T_0 - (T_{01} - T_0)[1 - \exp(-\gamma\tau)]\}, \quad (5)$$

где n_{OX} — количество водяного пара в полости, моль; n_{MOL} — количество водорода в полости, моль; T — температура облицовки из бериллия и ПГС, К; τ — время, с; K — константа скорости реакции, м/с; $Q = 3,7 \cdot 10^5$ Дж/моль — тепловой эффект реакции; V — объем полости, м³; F — площадь поверхности облицовки, м²; P_k — давление в контуре охлаждения; Z — пропускная способность сквозного отверстия в стенке полости; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); C — теплоемкость бериллия, Дж/(г·К); ρ_{Be} — плотность бериллия, г/м³; ρ_{LK} — плотность теплоносителя, г/м³; ω — объем слоя бериллия, м³; Θ — коэффициент теплопередачи между облицовкой и внешней стенкой полости, Вт/(м²·К). При $\tau = 0$ производные больше нуля, $n_{\text{OX}} = n_{\text{MOL}} = 0$, $T > 0$. В интервале $0 < \tau < \infty$ функции n_{OX} , n_{MOL} , T — больше нуля.

ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ, ПРИНЯТЫХ В РАСЧЕТАХ

В работе рассматривали процессы, происходящие в сферической полости радиусом 0,1 м, внутренняя поверхность которой покрыта облицовкой из бериллия толщиной 0,01 м.

В расчетах принимали, что поступление воды в полость происходит по закону Пуазейля через сквозное круглое отверстие в нижней точке сферы.

Параметры модели, принятые в расчетах:

Радиус сферической полости, м ...	0,1
Толщина слоя бериллия, м ...	0,01
Диаметры сквозного отверстия, м ...	$5 \cdot 10^{-5}$; $7 \cdot 10^{-5}$; $1 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$
Температура слоя бериллия в начале опыта, °С ...	650
Температура воды-теплоносителя, °С ...	280
Давление теплоносителя, МПа ...	6,42
Максимальный прирост температуры после потери теплоносителя, °С ...	350
Основной расчетный интервал времени процесса, с ...	От 0 до 100

Размеры отверстий выбирали, руководствуясь пропускной способностью сквозного отверстия (поток воды и/или пара при выбранном перепаде давлений между охлаждающим контуром и полостью) и исходя из имеющегося опыта исследований дефектных участков герметизирующих соединений различного типа.

Принятая в расчетах толщина облицовки из бериллия близка к толщине, выбранной для покрытия стенок плазменной камеры реактора ИТЭР. Приняли, что давление и температура теплоносителя, поступающего в полость, имеют значения, аналогичные параметрам для атомных энергетических реакторов BWR и PWR [3]. Температура облицовки из бериллия выбрана близкой к температуре покрытия из этого металла в плазменной камере ИТЭР.

Коэффициент теплоотдачи через контакт между слоем бериллия и стенкой полости принимали эквивалентным коэффициенту теплоотдачи через зазор. При этом считали, что теплопроводность среды в зазоре близка обычной для большинства газов. Несомненно, реальная природа теплового контакта между бериллиевой облицовкой и стенкой полости, особенно в ходе окисления в водяном паре, будет более сложной. Однако характеристики теплового контакта позволяют представить требуемую степень обработки поверхностей контакта для их взаимной подгонки (или размеры щели между покрытием и внешней стенкой полости при частичном или полном нарушении контакта между ними).

Характеристики теплового контакта, принятые в расчетах:

Зазор, м ...	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К) ...	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^2$	2
Теплопроводность среды в зазоре, Вт/(м·К) ...		$1 \cdot 10^{-2}$	

В работе были проведены расчеты, сочетающие следующие варианты:

— два случая проводимости контактного слоя. В первом случае принято, что коэффициент теплоотдачи между бериллием и стенкой полости после потери теп-

лоносителя остается близким к исходному, т.е. равным 10^4 Вт/(м²·К). Во втором случае он снижается до значений 2 Вт/(м²·К), имитируя аварийный процесс с частичным отслоением облицовки из бериллия от стенки полости;

— четыре размера сквозного отверстия во внешней стенке полости — канала поступления воды/водяного пара в полость;

— два темпа изменения температуры внешней стенки полости, имитирующей нагрев, обусловленный остаточным тепловыделением.

Далее представлены результаты расчетов изменения состава ПГС и ее температуры по этим вариантам.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 2 представлены кривые роста температуры, имитирующие два режима остаточного тепловыделения после потери теплоносителя. Данные кривые не отражают реального выделения тепла при потере теплоносителя на реакторе ИТЭР, а носят характер регулируемого параметра, например, для экспериментов на небольшой установке.

Результаты расчетов процессов в полости при коэффициенте теплоотдачи между облицовкой и внешней стенкой, равном 10^4 Вт/(м²·К). На рис. 3 и 4 представлено изменение температур для вариантов с диаметрами сквозного отверстия $5 \cdot 10^{-5}$; $7 \cdot 10^{-5}$; $1 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ м. Изменение практически одинаково для всех размеров сквозных отверстий. Кривые отражают спад температуры от 923 К (рабочая температура слоя и полости до начала аварии) до минимума, равного 620 К. Далее температура, пройдя минимум, начинает расти за счет изменения температуры внешней стенки, имитирующей результат остаточного тепловыделения, согласно уравнению (1).

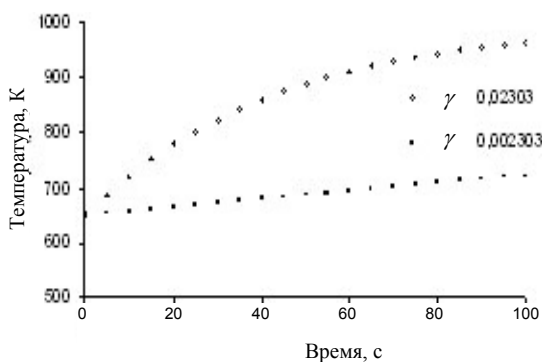


Рис. 2. Разогрев стенки полости, имитирующий последствия потери теплоносителя и воздействия остаточного тепловыделения, полученный расчетным путем; γ — временная постоянная, 1/с

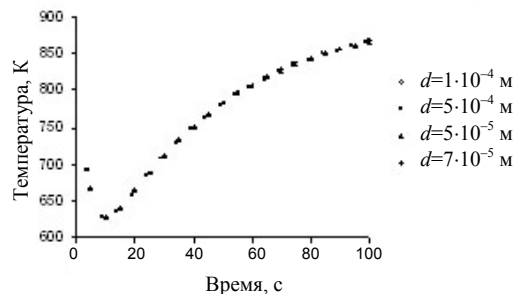


Рис. 3. Изменение температуры в полости при плотном тепловом контакте между облицовкой и внешней стенкой полости в условиях остаточного тепловыделения с характеристикой $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$

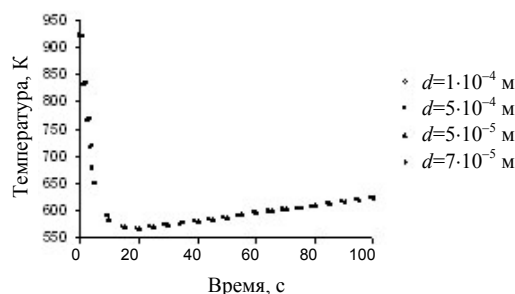


Рис. 4. Изменение температуры в полости при плотном тепловом контакте между облицовкой и внешней стенкой полости в условиях остаточного тепловыделения с характеристикой $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$

На рис. 5 и 6 представлены кривые изменения содержания водяного пара в объеме полости для двух скоростей нагрева внешней стенки полости за счет различного остаточного тепловыделения.

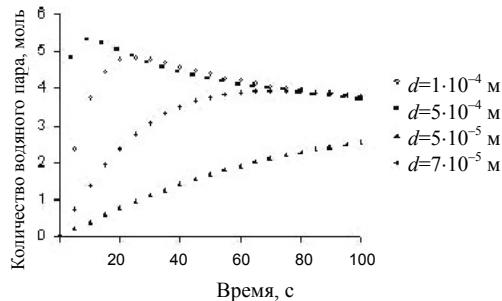


Рис. 5. Зависимость содержания водяного пара в полости от времени для $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ при разных размерах сквозного отверстия

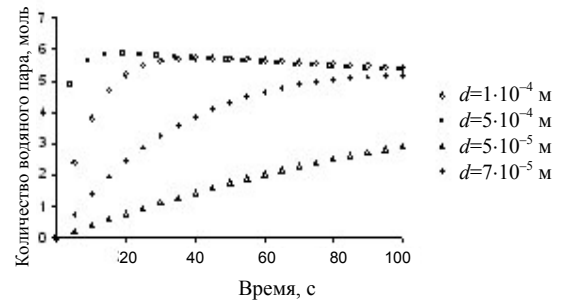


Рис. 6. Зависимость содержания водяного пара в полости от времени для $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при разных размерах сквозного отверстия

Максимум на зависимости содержания водяного пара в полости от времени наблюдается при поступлении воды в полость через наибольшие из сквозных отверстий. Это явление объясняется частичным оттоком воды обратно в контур через сквозное отверстие в результате некоторого превышения давления ПГС в полости над давлением в контуре. Превышение давления ПГС над давлением в контуре возникает в результате роста температуры после прохождения ее значений через минимум.

Накопление водорода в полости в расчетном интервале времени определяется общей длительностью пребывания слоя бериллия при температурах выше $\sim 750 \text{ К}$, при которых взаимодействие бериллия с водяным паром приобретает заметную скорость. При интенсивности остаточного тепловыделения, соответствующей значению постоянной времени $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, слой бериллия оказывается при таких температурах дважды: в период остывания с 923 до 750 К и после прохождения температурного минимума — при повторном достижении температур выше $\sim 750 \text{ К}$. Это хорошо видно при сопоставлении рис. 2 и 6. Видно, что по истечении $\sim 60 \text{ с}$ образование водорода возрастает.

При $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ возрастание температуры после температурного минимума происходит медленнее. В расчетном интервале от 0 до 100 с температуры выше $\sim 750 \text{ К}$ повторно не достигаются. В результате в полости находится только то количество водорода, которое успело образоваться в период остывания полости от 923 до $\sim 750 \text{ К}$.

Можно видеть, что в рассматриваемых расчетных случаях на рис. 7 и 8 изменение числа молей водяного пара за счет образования эквивалентного числа молей водорода меньше, чем изменение числа молей водяного пара, связанное с обратным оттоком воды в контур при увеличении давления ПГС.

Результаты расчетов процессов в полости при снижении коэффициента теплоотдачи между облицовкой и внешней стенкой до значения $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При частичном отделении облицовки из бериллия от внешней стенки полости между ними происходит значительное снижение теплового контакта. Для такого случая были также проведены аналогичные расчеты и представлены результаты изменения температуры в полости и накопления в ней водяного пара и водорода.

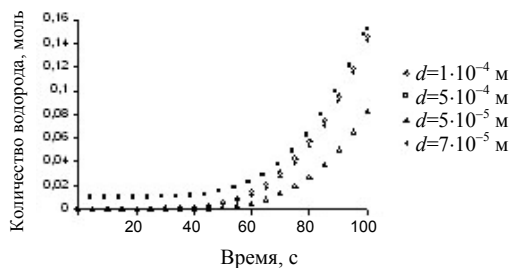


Рис. 7. Зависимость содержания водорода в полости от времени для $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ при разных размерах сквозного отверстия

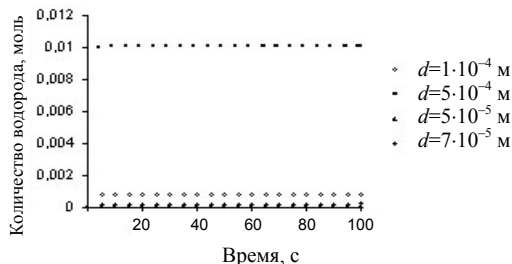


Рис. 8. Зависимость содержания водорода в полости от времени для $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ при разных размерах сквозного отверстия

Расчеты показали, что из-за низкого коэффициента теплоотдачи между облицовкой из бериллия и внешней стенкой скорости окисления бериллия водяным паром одинаковы, т.е. не «чувствуют» изменений температуры стенки полости, обусловленных остаточным тепловыделением. На начальном временном участке зависимости (рис. 9) рост температуры подчиняется экспоненциальному закону с последующим выходом на плато на втором участке. Время выхода температурных кривых на плато оказалось зависимым от размера сквозного отверстия, по которому в полость поступает вода и/или пар.

На рис. 10, также общем для двух темпов изменения температуры в результате остаточного тепловыделения, показано изменение количества водяного пара в полости в зависимости от времени. Видно, что кривые зависимости для водяного пара определяются только размерами отверстия и нечувствительны к характеру изменения температуры, обусловленному различной интенсивностью остаточного тепловыделения. Кривые проходят через явно выраженный максимум с последующим снижением содержания водяного пара в полости до значений, близких к нулевым.

Из рис. 9 и 10 видно, что нарушение теплового контакта между бериллиевой облицовкой и внешней стенкой полости способствует увеличению температуры облицовки и ускорению экзотермической реакции с водяным паром независимо от температуры внешней стенки полости. В результате в течение нескольких десятков секунд основная доля водяного пара взаимодействует с бериллиевой облицовкой. Образовавшийся при реакции водород создает давление, препятствующее

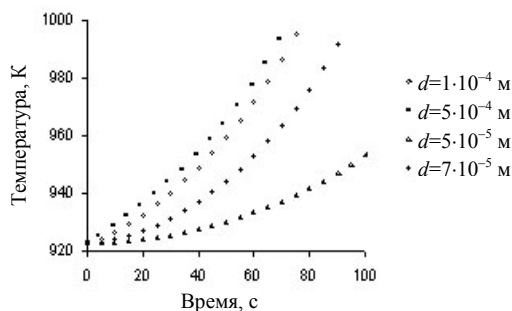


Рис. 9. Одинаковый характер изменения температуры в полости при нарушенном тепловом контакте между облицовкой и внешней стенкой полости в условиях различного остаточного тепловыделения (с характеристиками $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-2}$ и $2,303 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$)

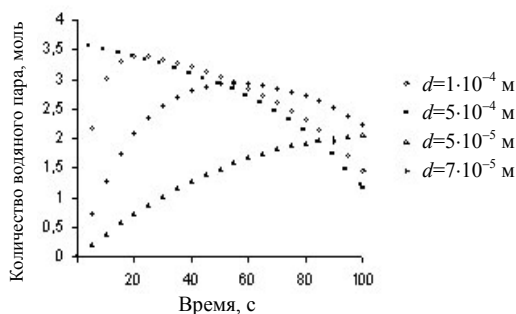


Рис. 10. Одинаковая зависимость содержания водяного пара в полости от времени в условиях различного остаточного тепловыделения (при $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-2}$ и $2,303 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$)

дальнейшему поступлению воды в полость через сквозное отверстие. Это хорошо видно на рис. 11, где для тех же условий показаны расчетные результаты накопления водорода в полости при реакции водяного пара с бериллием.

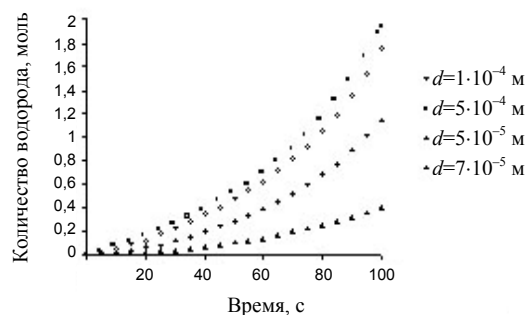


Рис. 11. Одинаковая зависимость содержания водорода в полости от времени в условиях различного остаточного тепловыделения (при $\gamma = 2,303 \cdot 10^{-2}$ и $2,303 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$)

Дополнительными расчетами с помощью уравнения Клапейрона было показано, что выход зависимости количества водорода в полости от времени на плато соответствует достижению практического равенства давлений в полости и в контуре охлаждения.

Независимость образования водорода от температуры внешней стенки полости и различий в интенсивности остаточного тепловыделения позволила оба варианта представить на общем рис. 11.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Полезно напомнить, что результаты расчетов получили, допустив, что прочность внешней стенки полости достаточна, чтобы выдержать любое давление в полости. Это позволило сосредоточиться на процессах в полости. Ожидалось, что экспоненциальный рост скорости экзотермической реакции окисления бериллия при увеличении температуры и значительный тепловой эффект приводят к резкому увеличению температуры и давления в полости при поступлении в нее определенных количеств воды/водяного пара. Предложенные уравнения и программа для их интегрирования позволили получить количественные зависимости от времени изменения качественного состава ПГС и ее количества в замкнутой полости на основе достаточно простых условий. Эти условия, тем не менее, привлекательны, так как они представляют собой конкретные технические параметры, такие, как:

- размер сквозного отверстия во внешней стенке полости, определяющий поступление воды/водяного пара в ее объем;
- величину теплоотдачи между облицовкой из бериллия и внешней стенкой, лимитирующую до определенного момента скорость реакции окисления;
- данные о временном характере изменения температуры внешней стенки полости;
- давление в контуре — источнике поступления воды в полость;
- свойства облицовки из бериллия.

Знание объема полости, температуры в ней и количества ПГС в молях позволяет в любой момент расчетного времени с помощью известных уравнений вычислить давление в полости. Последняя величина дает возможность определить внутреннее давление в ходе развития процессов, связанных с поступлением воды в полость. Сочетание данных о содержании водорода и давлении ПГС в полости позволяет предсказать реальную опасность ситуации для заданного момента времени при конкретном сочетании параметров. Иными словами, оценить запас прочности до разрушения стенок полости и количество водорода, способного взорваться при контакте с кислородом воздуха после разрушения стенок.

Расчеты демонстрируют определяющую роль экспоненциальной зависимости от температуры скорости реакции окисления бериллия в развитии процессов в замкнутой полости. Несомненно, интересно исследовать в ходе дальнейших расчетов факторы, снижающие роль экспоненциальной зависимости от температуры скорости реакции окисления бериллия.

Следует отметить ряд допущений, принятых для предложенной системы дифференциальных уравнений. При расчетах с их помощью предполагали, что:

- реакция водяного пара с облицовкой из бериллия протекает по всей поверхности в полости с одинаковой скоростью, т.е. температура облицовки по всей полости одинакова;

- коэффициент теплоотдачи между облицовкой и внешней стенкой по всей поверхности стенки одинаков, т.е. нарушение теплового контакта между ними если происходит, то везде в равной степени;

- вода, поступающая в полость, превращается в пар с температурой, равной температуре облицовки;

- температура парогазовой смеси и облицовки одинакова, т.е. теплообмен между ними происходит мгновенно;

- прочность стенок сферической полости «бесконечно» велика, т.е. можно пренебречь вероятностью разрушения внешней стенки.

Очевидно, что в случае расчетного исследования аналогичных процессов в плазменной камере термоядерного реактора понадобится учесть возможность неоднородного нарушения теплового контакта между облицовкой и внешней стенкой, т.е. возникновения «тепловых пятен» с различной температурой и, соответственно, с разной скоростью реакции окисления в этих «пятнах». Очевидно, в подобных случаях возникнет необходимость учета лучистого теплообмена между участками облицовки с разной интенсивностью окисления.

Дополнительным усложняющим фактором, несомненно, должна оказаться различная скорость окисления участков облицовки с различной пористостью бериллия. В работе [4] представлены аналогичные расчетные данные об окислении бериллиевой облицовки с пористостью, близкой к нулю.

Несомненно, что в обсуждаемых случаях, сопряженных с лучистым теплообменом на участках тороидальной поверхности стенок плазменной камеры термоядерного реактора, необходим учет угловых коэффициентов для диффузных поверхностей, образующих замкнутую систему [5].

Возможно, в определенных расчетных случаях потребуется учет прочностных характеристик стенок плазменной камеры при увеличении давления ПГС. В случае моделирования последствий аварии, включающих разрушение стенок полости (плазменной камеры), следует принять во внимание результаты исследований [6—9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системой дифференциальных уравнений описаны процессы в замкнутой полости, обусловленные поступлением водяного пара и его реакцией с облицовкой из бериллия внутри полости.

С помощью расчетов на основе предложенной системы уравнений показана

возможность анализа процессов в замкнутой полости, в которую поступает водяной пар при повышенных температурах.

Проделанными расчетами исследован частный случай применительно к сфере радиусом 0,1 м, имеющей внутреннее покрытие из бериллия толщиной 0,01 м. В расчетах использовали данные о кинетике реакции водяного пара с бериллием, имеющим пористость от 5 до 7,65%.

Исследовано влияние теплопередачи между облицовкой из бериллия и стенкой полости на процессы роста температуры и изменения соотношения компонентов ПГС.

Представлены результаты расчетов при значениях коэффициента теплоотдачи 10^4 и $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, соответствующих плотному и нарушенному контакту. Ухудшение контакта способствует ускорению реакции бериллия с паром.

В частном расчетном случае показано, что при диаметрах сквозных отверстий в стенке полости от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ м под давлением воды 6,42 МПа и при начальной температуре 650 К процессы в полости в значительной степени определяются экспоненциальным характером зависимости скорости окисления бериллия от температуры.

Авторы выражают искреннюю благодарность Е.В. Бухарину за разработку компьютерной программы INTEGRATE Version 1.0 и признательны Б.М. Шелиге за содействие в запуске программы в системе WINDOWS 2000, с удовольствием благодарят за содержательную помощь в проведении расчетов и обработке их результатов С.Н. Сорокину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sorokin S.I., Davydov D.A.** Study of the oxidation kinetics and heat processes in the chemical reaction between water vapor and compact, porous and powder beryllium. — *Plasma Devices and Operations*, 2003, vol. 11, № 4, p. 257—277.
2. **Сорокин С.И., Давыдов Д.А.** Исследование константы скорости реакции при окислении водяным паром компактного и пористого бериллия и бериллиевого порошка. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2002, вып. 3—4, с. 102—117.
3. **Rahn F.J., Adamantiades A.G., Kenton J.E., Braun C.** A Guide to nuclear power technology. — John Wiley and Sons. N.Y., 1984; Ран Ф., Адамантиадес А., Кентон Дж., Браун Ч. Справочник по ядерной энерготехнологии. Под ред. В.А. Легасова. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. **Sorokin S.I., Davydov D.A.** *Plasma Devices and Operations*. (в печати).
5. **Зигель Р., Хауэлл Дж.** Теплообмен излучением. — М.: Изд-во Мир, 1975.
6. **Давыдов Д.А., Горохов В.А., Капышев В.К., Сорокин С.И.** Исследование взаимодействия компактного и пористого бериллия с воздухом и водяным паром с точки зрения проблемы бериллиевой безопасности реактора ИТЭР. — *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 1995, вып. 1(52), с. 74—81.
7. **Davydov D.A. et al.** Beryllium-Steam and Beryllium-Air Reaction Data. Task No.: S81TT-13 (Status Report), ITER-RF-96-BIIM-SEH-I, VNIINM, Moscow, July 16, 1996. 44 p.
8. **Davydov D.A., Gorokhov V.A., Kononov Yu.V., Levin V.B., Sorokin S.I., Chekhlatov G.M.** Beryllium-air and beryllium-steam chemical interaction study from the viewpoint of ITER safety. — In: Proc. of SOFT-20, Marseilles, France, 7—11 September, 1998, p. 1605—1608.
9. **Davydov D.A., Kononov Yu.V., Gorokhov V.A., Levin V.B., Sorokin S.I., Chekhlatov G.M.** Beryllium-Steam and Beryllium-Air Reaction Data. Task No.: S81TT-13 (Final Report), HT Ref. No. RF-1-F147.17/07/98U, VNIINM, Moscow, July 17, 1998. 22 p.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2004 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 1, с. 10—20.