УДК 544.45, 621.039

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИДКОФАЗНОГО ГОРЕНИЯ ЦИРКОНИЯ

Сулацкий А.А.

ФГУП "Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова", Сосновый Бор, Ленинградская область, Россия

АННОТАЦИЯ

В докладе представлена математическая полуэмпирическая модель жидкофазного горения (ЖФГ) циркония, входящего в состав расплава кориума, образующегося при тяжёлой аварии реактора типа ВВЭР и находящегося во внутреннем объёме устройства локализации. Горение имеет место в тонком слое расплава (фронт горения – ФГ), примыкающем к поверхности твёрдого "жертвенного материала", являющегося источником кислорода. На основании экспериментальных данных разработана модель процесса, пригодная для произвольных условий теплообмена между ФГ и расплавом. Предложены безразмерные переменные, позволяющие в обобщённой форме описать процесс. Рассмотрены частные случаи теплообмена между ФГ и расплавом. Получены условия возникновения апериодической неустойчивости ЖФГ циркония.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из защитных барьеров на пути распространения радиоактивных материалов во внешнюю среду при тяжелой аварии на АЭС являтся внекорпусное устройство локализации расплава (УЛР), называемое также "ловушкой расплава". Для АЭС нового поколения с ВВЭР, в том числе для сооружаемых в настоящее время ЛАЭС-2 и НВАЭС-2, разработана ловушка тигельного типа [1, 2], поступая в которую расплав кориума локализуется в полости, имеющей внешнее водяное охлаждение и частично заполненной так называемым жертвенным материалом (ЖМ).

Расплав кориума, поступающий в УЛР, состоит из двух жидких компонентов: оксидного и металлического, причём оксидная жидкость может содержать неокисленный цирконий (помимо его оксида). При этом оксидная жидкость, за счёт содержащегоя в ней большого количества диоксида урана, может иметь плотность, существенно большую, чем металлическая жидкость. Поэтому оксидная жидкость может занимать нижнее положение в УЛР. При этом над ней располагается слой более лёгкой металлической жидкости, что, из-за эффекта, фокусирующего тепловой поток из расплава именно в металлическом слое, является неблагоприятным фактором, сказывающимся на условиях удержания кориума в УЛР. Другим фактором, негативно влияющим на работоспособность УЛР, является высокая температура поступающего кориума. Так, в соответствии с различными сценариями тяжёлой аварии начальная температура оксидной составляющей расплава кориума в УЛР может достигать величины 2700–3000°С.

Назначением ЖМ является разбавление поступающего из реактора расплава кориума с целью уменьшения его температуры, увеличения поверхности теплоотвода и уменьшения плотности оксидного расплава (последнее обеспечивает изменение взаимного расположения оксидного и металлического слоев расплава), а также окисление содержащегося в поступающем расплаве неокисленного циркония для уменьшения генерации водорода при паро-циркониевой реакции. В состав ЖМ входят как стальная, так и оксидная части. Причём, в оксидном ЖМ должен содержаться компонент с высоким окислительным ресурсом. В данной работе рассматривается только оксидный ЖМ.

По результатам комплекса экспериментальных и расчетных исследований [1] для ЖМ был рекомендован близкий к эквимолярному

© Сулацкий А.А.

состав смеси оксидов Fe_2O_3 (65–70 масс. %) и Al_2O_3 (30–35 масс. %).

Для расчетного моделирования процессов в ловушке и обоснования её эффективности необходимо знание кинетики и механизма взаимодействия расплава кориума с ЖМ. Кинетика взаимодействия ЖМ с расплавом кориума зависит от того, с каким компонентом расплава контактирует ЖМ: с расплавом металлов, с полностью окисленным или с субокисленным расплавом кориума. Неокисленный Zr, содержащийся в субокисленном расплаве, обусловливает экзотермические окислительно-восстановительные химические реакции с оксидами железа, содержащимися в ЖМ. Данная работа посвящена изучению взаимодействия ЖМ с расплавом субокисленного кориума.

В работах [3, 4] изложены результаты экспериментального исследования кинетики взаимодействия ЖМ с расплавом субокисленнного кориума. Состав ЖМ, использованного в опытах [3], масс.%: Fe_2O_3 – 67, Al_2O_3 – 33. В эксперименте [4] состав ЖМ был несколько иной, масс.%: Fe_2O_3 – 56, FeO – 20, Al_2O_3 – 24. Представленные в [3, 4] экспериментальные исследования позволили выявить следующее:

• Основная химическая реакция, происходящая между субокисленным расплавом и компонентами ЖМ – экзотермическое окисление циркония оксидами железа с образованием диоксида циркония и металлического железа.

• Образующийся оксидный расплав гомогенен по структуре. Расслоение имеет место только между оксидами и железом, образующимся при химической реакции.

• Скорость движения фронта взаимодействия ≈1,90 мм/с, приблизительно постоянна для условий экспериментов и фактически **не зависит от концентрации циркония в расплаве**, если последняя превышает 0,4 масс.%.

В [5] было показано, что взаимодействие такого типа протекает в режиме **жидкофазного горения**.

Данные исследования позволили разработать модель процесса [3], которая обобщала полученные экспериментальные результаты [3, 4] и была использована в коде CORCAT [2], применяемом для моделирования формирования ванны расплава в устройствах локализации тигельного типа для АЭС с ВВЭР. Предложенная в [3] полуэмпирическая модель обладала рядом существенных недостатков. Во-первых, она была разработана не в безразмерном виде, что фактически не позволяло проводить анализ влияния различных факторов на кинетику процесса, особенно при изменении условий теплообмена между фронтом горения (ФГ) и расплавом. И, во-вторых, она была достаточно сложна в использовании, в том числе при проведении расчётных исследований.

В данном докладе изложены результаты модернизации математической модели [3] процесса ЖФГ циркония. Предложены безразмерные переменные, позволяющие в удобной компактной форме описать процесс. Рассмотрены два частных случая теплообмена между ФГ и расплавом. Получены условия возникновения апериодической неустойчивости ЖФГ циркония.

ХИМИЯ ПРОЦЕССА

Во-первых, как было подтверждено результатами пост-тест анализа образовавшихся после экспериментов [3, 4] слитков и проб расплава, основным процессом при взаимодействии расплава субокисленного кориума с ЖМ являются следующие экзотермические окислительно-восстановительные реакции

$$3Zr + 2Fe_2O_3 = 3ZrO_2 + 4Fe \quad (1)$$

$$Zr + 2FeO = ZrO_2 + 2Fe \quad (2)$$

с энергетическими эффектами, близкими к 1.8·106 и 0.6·106 Дж/моль, соответственно.

Во-вторых, в ходе прогрева и абляции ЖМ в нём образуется температурное поле с постепенным подъёмом температуры от начальной температуры ЖМ до температуры его плавления/разложения на границе с расплавом. ЖМ представляет собой композитный керамический материал, поэтому температура его ожижения заведомо ниже, чем температура плавления компонентов. Согласно расчётам, проведённых с помощью кода GEMINI2 [6] и термодинамической базы данных NUCLEA [7], было показано, что температура солидус для ЖМ в опытах [3] было 1420(±5)°C, а в опытах [4] – 1400(±5)°C. Для температуры ликвидус были получены значения 1550(±5) и 1490(±5)°C, соответственно. В качестве температуры поверхности ЖМ (T_*) на границе с расплавом в данной модели была принята температура солидус, постоянная для фиксированного состава ЖМ.

Кроме того, как следовало из проведённых термодинамических расчётов, вплоть до темпе-

ратуры ликвидус заметного разложения Fe_2O_3 на FeO и O_2 не происходит, поэтому в модели было пренебрежено возможной реакцией циркония с кислородом, образующимся в указанной реакции разложения. Т.е. было принято, что в ходе ЖФГ циркония имеют место лишь реакции (1) и (2).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Важным экспериментальным результатом является тот факт, что скорость движения ФГ приблизительно постоянна и фактически не зависит от концентрации циркония (восстановителя) в расплаве в широком диапазоне изменения этого параметра. Такая ситуация характерна для горения, находящегося в диффузионной стадии, когда скорость процесса лимитируется подводом окислителя, который в случае реакций (1), (2) представляет собой оксиды железа Fe_2O_3 и FeO, соответственно. С учётом этого факта была предложена модель (см. рис.1), основные предположения и допущения которой следующие:

1. При взаимодействии расплава с жертвенным материалом происходят жидкофазные химические реакции (1), (2) между оксидами железа и цирконием с эффективностью 100%.

2. Данные реакции и соответствующее тепловыделение происходят в тонком жидком ФГ, примыкающем к твёрдой поверхности ЖМ.

3. Тепло химических реакций затрачивается на разогрев и плавление ЖМ и на разогрев поступающих в ФГ компонентов расплава до его температуры ($T_{ФГ}$).

4.Теплообмен между ФГ и ЖМ и между ФГ и расплавом, подвод в ФГ циркония из расплава и удаление продуктов реакции из ФГ осуществляется за счет турбулентной свободной конвекции.

5. В силу высокой скорости абляции W и низкой теплопроводности ЖМ его прогревом за пределами плавящегося слоя пренебрегается.

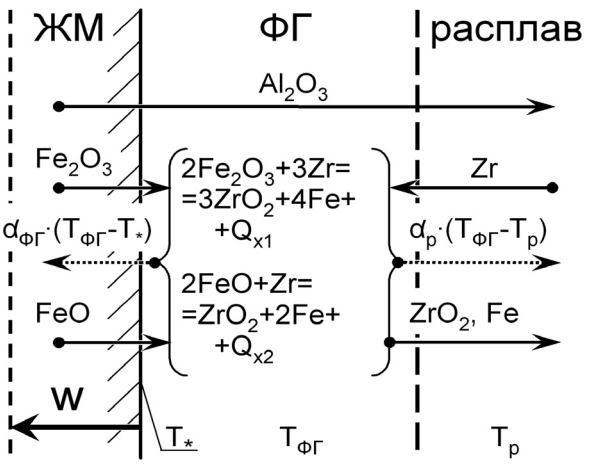

Рис.1 Схема процесса.

Математически данные предположения выражаются в виде следующего стационарного уравнения сохранения энергии ФГ, записанного для единицы его поверхности:

$$\begin{aligned} Q_{x1}+Q_{x2} &= \alpha_{ФГ}\cdot(T_{ФГ}-T_*)+\alpha_p\cdot(T_{ФГ}-T_p)+ \\ &+c_{Al2O3}\cdot(T_{ФГ}-T_*)G_{Al2O3}+ \\ &+c_{Fe2O3}\cdot(T_{ФГ}-T_*)G_{Fe2O3}+ \\ &+c_{FeO}\cdot(T_{ФГ}-T_*)G_{FeO}+c_{Zr}\cdot(T_{ФГ}-T_p)G_{Zr} \end{aligned} \quad (3)$$

Плотности массовых потоков компонентов ЖМ в ФГ равны, кг/(м^{2}с):

$$G_j = n_j G_{ЖМ}, \quad j = Al2O3, Fe2O3, FeO, \quad (4)$$

где n_j – массовые доли соответствующих компонентов ЖМ, $G_{ЖМ}=\rho_{ЖМ}W$ – плотность массового потока ЖМ, кг/(м^{2}с); $\rho_{ЖМ}$ – плотность твёрдого ЖМ, кг/м^3. Плотность массового потока циркония из расплава в ФГ равна, кг/(м^{2}с):

$$G_{Zr} = \gamma G_{ЖМ} \quad (5)$$

где γ – стехиометрический коэффициент для Zr в реакциях (1) и (2). c_{Al2O3}, c_{Fe2O3}, c_{FeO}, c_{Zr} – теплоёмкости компонентов в жидком состоянии, Дж/(кг°С).

Тепло химических реакций (1), (2) можно выразить через плотность массового потока ЖМ ($G_{ЖМ}$) следующим образом:

$$Q_{x1}+Q_{x2} = r_x G_{ЖМ} \quad (6)$$

где r_x – тепло химических реакций в расчёте на единицу массы ЖМ, Дж/(кг ЖМ).

Выражение для коэффицента теплообмена межуд расплавом и ФГ можно обобщённо представить в виде:

$$\begin{aligned} \alpha_p &= \alpha_p^{(*)}(\varphi, q_v)\cdot\left|\frac{T_{ФГ}-T_p}{T_{ФГ}-T_*}\right|^{1/m} = \\ &= \alpha_p^{(*)}(\varphi, q_v)\cdot|y-1|^{1/m} \end{aligned} \quad (7)$$

где введено следующее безразмерное обозначение для перегрева ФГ относительно температуры T_*:

$$y = \frac{T_{ФГ} - T_*}{T_р - T_*} = \frac{\Delta T_{ФГ}}{\Delta T_р} \quad (8)$$

а $\alpha_р^{(*)}(\varphi, q_v)$ – коэффициент теплообмена между расплавом и поверхностью ЖМ в случае отсутствия ФГ, который может зависеть от ориентации твёрдой поверхности (φ – угол между вертикалью и касательной к поверхности ЖМ), плотности объёмного тепловыделения в расплаве (q_v) и свойств расплава.

В [3] предложено выражение для коэффициента теплообмена между ФГ и твёрдой поверхностью ЖМ в данных специфических условиях, которое с использованием (8) имеет вид:

$$\alpha_{ФГ} = \alpha_{ФГ}^{(*)}(\varphi) \cdot y^{1/3} \quad (9)$$

где

$$\alpha_{ФГ}^{(*)} = C_{ФГ} \cdot \left(\frac{r_x}{r_{ЖМ}}\right)^{1/3} \times \times \left[\frac{c_{ФГ}(\rho_{ФГ}\lambda_{ФГ})^2 \beta_{ФГ} \Delta T_{ФГ}\, g \cdot \cos(\varphi)}{\mu_{ФГ}}\right]^{1/3} \quad (10)$$

$C_{ФГ}$= 0,21 – эмпирический безразмерный коэффицент; $r_{ЖМ}$ – тепло, необходимое для плавления и нагрева единицы массы ЖМ от его начальной температуры до T_*, Дж/кг; $c_{ФГ}$, $\rho_{ФГ}$, $\lambda_{ФГ}$, $\beta_{ФГ}$, $\mu_{ФГ}$– удельная теплоёмкость, плотность, теплопроводность, коэффициент объёмного термического расширения и динамическая вязкость расплава в пределах ФГ, соответственно; g=9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения.

Тепло, отводимое от ФГ к ЖМ, тратится на плавление ЖМ и нагрев его от начальной температуры до T_*, т.е. имеет место связь:

$$\alpha_{ФГ}\Delta T_{ФГ} = r_{ЖМ} G_{ЖМ} \; (\equiv r_{ЖМ}\rho_{ЖМ} W) \quad (11)$$

Подставляя (4)÷(6) и (11) в (3) получим:

$$\left[r_x - r_{ЖМ} - c_{ЖМ}\Delta T_{ФГ} - c_{Zr}\gamma \cdot (\Delta T_{ФГ} - \Delta T_р)\right] \times \times \alpha_{ФГ}\Delta T_{ФГ} = r_{ЖМ}\alpha_р(\Delta T_{ФГ} - \Delta T_р) \quad (12)$$

где введено обозначение:

$$c_{ЖМ} = c_{Al2O3} n_{Al2O3} + c_{Fe2O3} n_{Fe2O3} + c_{FeO} n_{FeO} \quad (13)$$

Введём 2 безразмерных обозначения:

$$a = \left[\frac{r_{ЖМ}}{(c_{ЖМ} + c_{Zr}\gamma) \cdot \Delta T_р}\right] \cdot \left(\frac{\alpha_р^{(*)}}{\alpha_{ФГ}^{(*)}}\right) \quad (14)$$

$$x = \frac{r_x - r_{ЖМ} - c_{ЖМ}\Delta T_р}{(c_{ЖМ} + c_{Zr}\gamma) \cdot \Delta T_р} \quad (15)$$

Из вида (15) понятно, что x представляет собой безразмерный тепловой эффект химических реакций в ФГ за вычетом затрат тепла на плавление ЖМ и подогрев его компонентов от начальной температуры внешней среды до температуры расплава ($T_Р$).

Подставляя (7)÷(10) и (14), (15) в (12), получим:

$$y^{4/3} \cdot (x + 1 - y) = a \cdot |y - 1|^{1/m}(y - 1) \quad (16)$$

При произвольных значениях a и m не представляется возможным решить уравнение (16) в явном виде: $y = f_{a,m}(x)$. Однако из (16) простыми преобразованиями получается легко поддающееся анализу выражение для x, как функции от y:

$$x = y - 1 + a \cdot \frac{|y - 1|^{1/m}(y - 1)}{y^{4/3}} \quad (17)$$

С учётом того, что a всегда положительно, из (17) следует, что для того, чтобы имело место , т.е. для того, чтобы ФГ был горячее расплава, необходимо $x > 0$. При $x \le 0$ будет иметь место $0 < y \le 1$, т.е. ФГ будет не горячее расплава, но горячее поверхности твёрдого ЖМ.

Зная y при заданном x (и a, m), можно определить и скорость абляции ЖМ. Для этого удобнее ввести безразмерную скорость абляции:

$$\omega = \frac{(c_{ЖМ} + c_{Zr}\gamma) \cdot \rho_{ЖМ} W}{\alpha_р^{(*)}} \quad (18)$$

Подставляя (18) и ранее введённые обозначения для $G_{ЖМ}$, a и y в (11), получим следующее выражение для ω:

$$\omega = \frac{y^{4/3}}{a} \quad (19)$$

Таким образом, стационарное ЖФГ циркония в ванне расплава кориума в условиях тяжёлой аварии на АЭС с ВВЭР полностью определяется пятью безразмерными переменными и параметрами: $\{a, m, x, y, \omega\}$, причём независимыми из них являются только три: $\{a, m, x\}$, а два оставшихся определяются по этим трём аргументам.

ЖФГ ЦИРКОНИЯ ПРИ ОТСУТСТВИИ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В РАСПЛАВЕ КОРИУМА

Рассмотрим важный частный случай – свободноконвективный турбулентный теплообмен между ФГ и расплавом, не имеющим внутреннего тепловыделения. В этом случае наиболее характерное значение параметра m равно 3. При этом наиболее интересный и опасный с точки зрения надёжности функционирования УЛР случай – это $y > 1$, т.е. когда температура ФГ выше температуры расплава (что равносильно $x > 0$). Тогда уравнение (17) примет вид:

$$x = y - 1 + a \cdot \left(1 - \frac{1}{y}\right)^{4/3} \qquad (20)$$

Решение (20) и (19) представим в графическом виде. На рис. 2 и 3 показаны зависимости безразмерного перегрева ФГ (y) и безразмерной скорости абляции ЖМ (ω) от безразмерного теплового эффекта (x), соответственно. Характерной особенностью решения, как для перегрева ФГ, так и для скорости абляции ЖМ является резкий их рост в области $x \approx a$ при больших значениях a, начиная с a ≈ 10....100 и более. В случае малых a резкого роста не наблюдается – имеет плавное нарастание температуры ФГ с ростом x.

Отметим также, что область возможных решений для безразмерного перегрева ФГ ограничена сверху линией:

$$y = x + 1 \qquad (21)$$

являющейся решением уравнений (16), (17) или (20) при малых a: $a \to 0$. С практической точки зрения предельной зависимостью (21) можно с хорошей точностью (не хуже нескольких процентов) пользоваться в интервале: $0 < a \le 0{,}1$.

ЖФГ ЦИРКОНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В РАСПЛАВЕ КОРИУМАКОРИУМА

Рассмотрим другой важный частный случай – свободноконвективный турбулентный теплообмен между ФГ и расплавом, имеющим внутреннее тепловыделение (например – остаточное тепловыделение в продуктах деления). В этом случае коэффициент теплообмена между расплавом и ФГ (α_p) зависит от объёмной плотности тепловыделения и не зависит от температуры ФГ, т.е. имеет место m→+∞. Как и в предыдущем разделе, наиболее интересный и опасный с точки зрения надёжности функционирования УЛР случай – это $y > 1$, т.е. когда температура ФГ выше температуры расплава (что равносильно $x > 0$). Тогда уравнение (17) примет вид:

$$x = y - 1 + a \cdot \frac{y - 1}{y^{4/3}} \qquad (22)$$

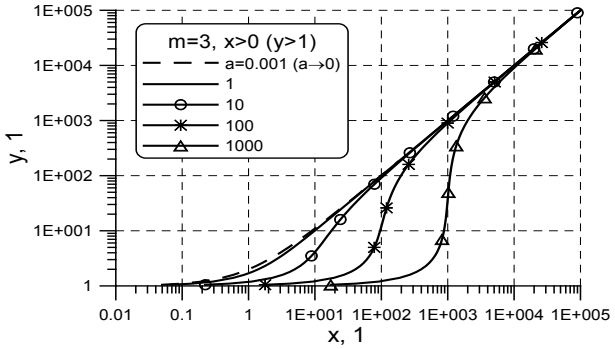

Рис.2 Зависимость безразмерного перегрева ФГ от безразмерного теплового эффекта при $m = 3$ и $x > 0$.

Решение (22) и (19) представим в графическом виде. На рис. 4 и 5 показаны зависимости безразмерного перегрева ФГ (y) и безразмерной скорости абляции ЖМ (ω) от безразмерного теплового эффекта (x), соответственно.

Основная особенность полученного решения – наличие области многозначности решения при больших a ($a > 100...1000$). Данная многозначность может вызвать апериодическую неустойчивость ЖФГ, когда при малом изменении теплового эффекта (x) происходит резкое значительное (порядок и более) скачкообразное увеличение перегрева ФГ (y) и скорости абляции ЖМ (ω).

Решение уравнения (22) при малых a ($a \to 0$) совпадает с решением уравнения (20) при малых a и даётся выражением (21).

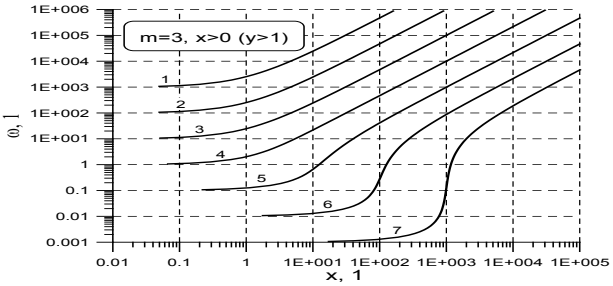

Рис.3 Зависимость безразмерной скорости абляции ЖМ от безразмерного теплового эффекта при $m = 3$ и $x > 0$: 1 – a=0,001; 2 – 0,01; 3 – 0,1; 4 – 1; 5 – 10; 6 – 100; 7 – 1000

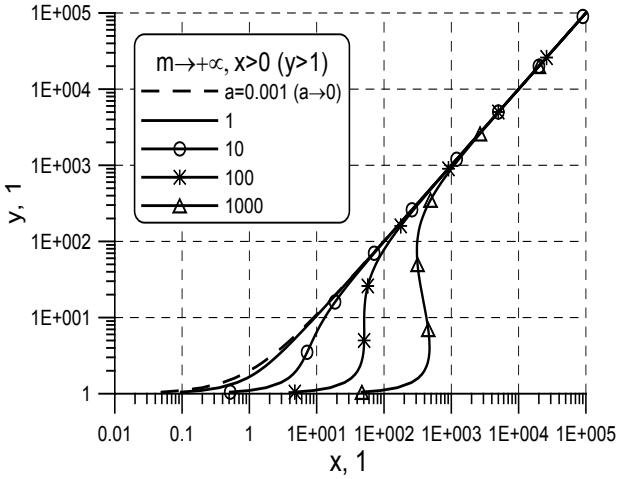

Рис.4 Зависимость безразмерного перегрева ФГ от безразмерного теплового эффекта при m→+∞ и $x > 0$.

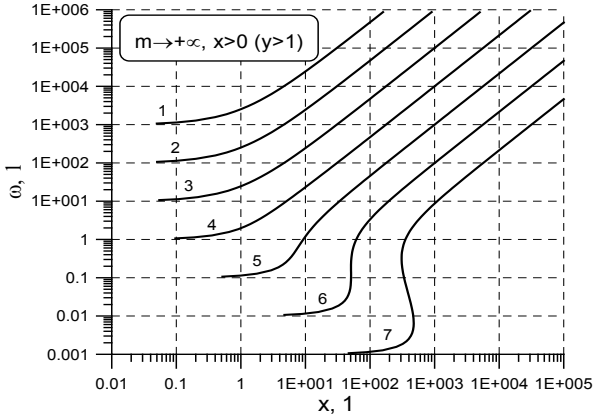

Рис.5 Зависимость безразмерной скорости абляции ЖМ от безразмерного теплового эффекта при m→+∞ и $x > 0$: 1 – a=0,001; 2 – 0,01; 3 – 0,1; 4 – 1; 5 – 10; 6 – 100; 7 – 1000

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЖФГ ЦИРКОНИЯ

Из рис.4 и 5 следует, что многозначность решения и, соответственно, апериодическая неустойчивость ЖФГ могут иметь место при превышении параметром a некоторой критической величины $a_{кр}$. Понятно, что критическим условиям соответствует появление на графике функции (17) экстремумов, т.е. точек, где равна нулю первая производная x по y. В момент появления экстремумов они совпадают с точкой перегиба, т.е. с точкой, где равна нулю вторая производная x по y. Таким образом, дважды дифференцируя функцию (17) по y и приравнивая первую и вторую производные нулю, получим следующее выражение для значения y в критической точке:

$$y_{кр,1(2)} = \frac{2m}{m-3} \cdot \left[2 \mp 3\sqrt{\frac{m+1}{4m-3}} \right] \qquad (23)$$

Из равенства нулю первой производной легко получить следующее выражение для $a_{кр}$:

$$a_{кр} = \frac{y_{кр}^{4/3}}{(y_{кр}-1)^{1/m}} \cdot \frac{1}{\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{y_{кр}-1}{y_{кр}} \right) - \left(\frac{m+1}{m} \right)} \qquad (24)$$

Подставляя решение (23) в (24) получим, что физичным решением является лишь $y_{кр,2}$, соответствующий знаку “+” перед квадратным корнем, и при $m > 3$. Во всех прочих случаях вещественных положительных значений $a_{кр}$ не существует. Таким образом, получили, что апериодическая неустойчивость ЖФГ возможна лишь при $m > 3$ и $a > a_{кр}$, где $a_{кр}$ вычисляется по формуле (24) с использованием (23).

ВЫВОДЫ

• Предложена математическая модель ЖФГ циркония, взаимодействующего с оксидным ЖМ ловушки кориума, образующегося при тяжёлой аварии на АЭС с ВВЭР.

• Предложено пять безразмерных переменных и параметров, позволяющих полностью описать стационарное ЖФГ. Показано, что лишь три из них являются независимыми переменными – аргументами. Две оставшихся, а именно, безразмерный перегрев ФГ и безразмерная скорость абляции ЖМ определяются как функции трёх независимых переменных.

• Рассмотрены два частных случая теплообмена между ФГ и расплавом: 1. при отсутствии объёмного тепловыделения в расплаве кориума и 2. при его наличии. Показано, что во втором случае возможно возникновение апериодической неустойчивости ЖФГ.

• Показано, что апериодическая неустойчивость ЖФГ возможна лишь при $m > 3$ и $a > a_{кр}$.

• Получены формулы для вычисления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Asmolov V.G., Bechta S.V., Berkovich V.M. et al. VVER-1000 Reactor Core Melt Catcher of Cold Crucible Type // Procideengs of Internatioanl Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 05), May 15-19, 2005 – Seoul, Korea – Paper 5238.
2. Khabensky V.B. et al. Severe Accident Management Concept of the VVER-1000 and the Justification of Corium Retention in a Crucible-type Core Catcher // Nuclear Engineering and Technology. – 2009. – V. 41. – N 5. – P. 561–574.
3. Асмолов В.Г., Сулацкий А.А., Бешта С.В. и др. Взаимодействие расплава активной зоны ядерного реактора с оксидным жертвенным материалом устройства локализации для АЭС с ВВЭР // ТВТ. – 2007. – Т. 45. – № 1. – С. 28–37.
4. Бешта С.В., Грановский В.С., Хабенский В.Б. и др. Взаимодействие оксидного жертвенного материала устройства локализации с расплавом кориума при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. Ч. 1. Взаимодействие с расплавом субокисленного кориума // Тр. 5-й Всерос. конф. по теплообмену. – М.: МЭИ, – 2010. – Т.1.
5. Гусаров В.В., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б. и др. Физико-химическое моделирование горения материалов с суммарным эндотермическим эффектом // Физика и химия стекла. – 2007. – Т. 33. – № 5. – С. 678–685.
6. Thermochemical Equilibria Calculation Code Complex Multicomponent Phases GEMINI2 (Gibbs Energy MINImizer). Version 3.4. THERMODATA. 1992-2003. Saint Martin D'Heres. France.
7. Nuclear Thermodynamic Database "NUCLEA". THERMODATA. 2003. Saint Martin D'Heres. France.