УДК 544.45, 621.039

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА КОРИУМА, СОДЕРЖАЩЕГО ЦИРКОНИЙ И УРАН, С ЖЕРТВЕННЫМ МАТЕРИАЛОМ УСТРОЙСТВ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Сулацкий А.А.

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

АННОТАЦИЯ

Целью работы является разработка пригодной к применению в расчётных кодах математической модели взаимодействия расплава кориума, содержащего неокисленные уран и цирконий, с имеющим значительный окислительный потенциал жертвенным материалом (ЖМ). ЖМ применяется в качестве наполнителя устройств локализации расплава (УЛР или "ловушки расплава"), использующихся для минимизации последствий тяжёлых аварий на АЭС.

Методы работы состоят в теоретическом анализе и в верификации разработанной математической модели с помощью имеющихся экспериментальных данных по взаимодействию расплава кориума с ЖМ в режиме жидкофазного горения (ЖФГ), характерного для случая расплавов, содержащих активные восстановители, такие как уран и цирконий, с твёрдым ЖМ, содержащим хороший окислитель – оксид железа (Fe_2O_3).

Результаты работы. Получена математическая модель взаимодействия расплава кориума с ЖМ. Модель пригодна для описания взаимодействия ЖМ с расплавом как субокисленного кориума (т.е. оксидного, содержащего неокисленный цирконий), так и металлического, содержащего неокисленные уран и цирконий. Модель представляет собой систему 6 алгебраических уравнений относительно 6 неизвестных, одна из которых представляет собой скорость абляции ЖМ. Введены безразмерные переменные, характеризующие процесс и упрощающие систему уравнений. Решение системы в условиях применения модели в расчётных кодах ищется численно.

Кроме того, численно исследована апериодическая неустойчивость процесса ЖФГ в зависимости от параметров процесса и от условий теплообмена между объёмом расплава и зоной протекания окислительно-восстановительных реакций – фронтом горения (ФГ). Показано, что наиболее опасным с точки зрения возникновения апериодической неустойчивости процесса является случай теплообмена между ФГ и расплавом, имеющим внутреннее энерговыделение (например, за счёт остаточного тепловыделения).

Научная новизна. Впервые получена математическая модель процесса ЖФГ, имеющего место при взаимодействии как расплава субокисленного кориума, так и содержащего уран и цирконий металлического расплава с имеющим значительный окислительный потенциал ЖМ. Более ранние математические модели позволяли корректно описывать лишь процесс взаимодействия ЖФГ при взаимодействии ЖМ лишь с расплавом субокисленного кориума.

Практическая значимость. Разработанная математическая модель применена в коде CORCAT, используемого для расчётов процессов, происходящих в устройствах локализации тигельного типа. В настоящее время с использованием данного компьютерного кода, и соответственно, разработанной математической модели взаимодействия расплава с ЖМ производятся расчёты процессов, происходящих в ловушках расплава при гипотетических тяжёлых авариях на АЭС новых проектов.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из защитных барьеров на пути распространения радиоактивных материалов во внешнюю среду при тяжелой аварии на АЭС являются внекорпусное устройство локализации расплава (УЛР), называемое также "ловушкой расплава". Для российских АЭС нового поколения разработана ловушка тигельного типа [1, 2], поступая в которую расплав кори-

© Сулацкий А.А.

ума локализуется в полости, имеющей внешнее водяное охлаждение и частично заполненной так называемым жертвенным материалом (ЖМ).

Расплав кориума, поступающий в УЛР, состоит из двух жидкостей: оксидной и металлической, причём оксидная жидкость содержит оксиды урана, циркония и неокисленный цирконий (т.е. фактически является субокисленной), а металлическая жидкость за счёт перераспределения компонентов между двумя жидкостями помимо компонентов стали содержит также цирконий и уран. Свободные Zr и U расплава кориума являются активными восстановителями и для снижения выхода водорода необходимо предотвратить их взаимодействие с водой или паром.

Другим важным 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.

ЖМ предназначен для снижения температуры расплава кориума в УЛР и увеличения поверхности охлаждения расплава. Дополнительными назначениями ЖМ являются окисление содержащихся в расплаве свободных урана и циркония, снижение плотности оксидного расплава и предотвращение возникновения вторичной критичности расплава.

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 исследований [1] для УЛР новых проектов российских АЭС был рекомендован ЖМ с составом, близким к эквимолярному состав смеси оксидов Fe_2O_3 (65–70 масс.%) и Al_2O_3 (30–35 масс.%). Близкое к указанному содержание Fe_2O_3 имеет и ЖМ для УЛР нового проекта АЭС Eu-APR1400, южнокорейской разработки [3].

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. Неокисленные Zr и U, содержащиеся в расплаве, обусловливают экзотермические окислительно-восстановительные химические реакции с оксидами железа, содержащимися в ЖМ. В [4] предложена модель взаимодействия ЖМ с субокисленным расплавом, основанная на механизме **жидкофазного горения** (ЖФГ). Данная работа посвящена разработке универсальной математической модели взаимодействия ЖМ как с субокисленным расплавом, так и с металлическим расплавом, содержащим неокисленные Zr и U.

Предложенная модель имеет безразмерный вид, позволяющий в удобной компактной форме описать процесс и удобный для применения в расчётных кодах. Кроме того, численно исследована апериодическая неустойчивость процесса ЖФГ в зависимости от параметров процесса и от условий теплообмена между объёмом расплава и зоной протекания окислительно-восстановительных реакций – фронтом горения (ФГ).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Как показано в более ранних работах [3, 4] взаимодействие расплава с ЖМ происходит в диффузионном режиме при голодании по окислителю – оксиду железа. С учётом этого факта была предложена модель ЖФГ (см. рис.1, 2), основные предположения и допущения которой следующие:

1. При взаимодействии расплава с жертвенным материалом происходят жидкофазные химические реакции, приведённые на рис.1, 2, между цирконием, ураном и оксидом железа (Fe_2O_3) с эффективностью 100%.

2. Данные реакции и соответствующее тепловыделение имеют место 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 температуры ФГ ($T_{ФГ}$).

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.

На рис. 1, 2 показано первое различие взаимодействия ЖМ с субокисленным расплавом и с металлическим расплавом, содержащим уран и цирконий. В первом случае восстановитель один – Zr, а во втором – два: U и Zr. Необходимо отметить, что окислителей может быть два – помимо оксида Fe_2O_3 в некоторых вариантах состава ЖМ, может содержаться также монооксид железа FeO [4]. Кроме того, в состав ЖМ могут входить оксиды, помимо оксида алюминия Al_2O_3, которые, как и он, не участвуют в окислительно-восстановительных реакциях. В данной работе для простоты изложения возможным наличием в ЖМ оксидов, помимо Fe_2O_3 и Al_2O_3, пренебрегается.

Второе отличие взаимодействия ЖМ с субокисленным расплавом от взаимодействия ЖМ с металлическим расплавом, содержащего U и Zr, состоит в условиях теплообмена между ванной расплава и ФГ. С одной стороны, ФГ в обоих случаях представляет собой двухфазную систему с достаточно высокой эффективной теплопроводностью. С другой стороны, ванна расплава в первом случае является оксидной и поэтому имеет более низкую теплопроводность, чем теплопроводность ФГ, а во втором случае – расплав металлический и имеет более высокую теплопроводность, чем теплопроводность ФГ.

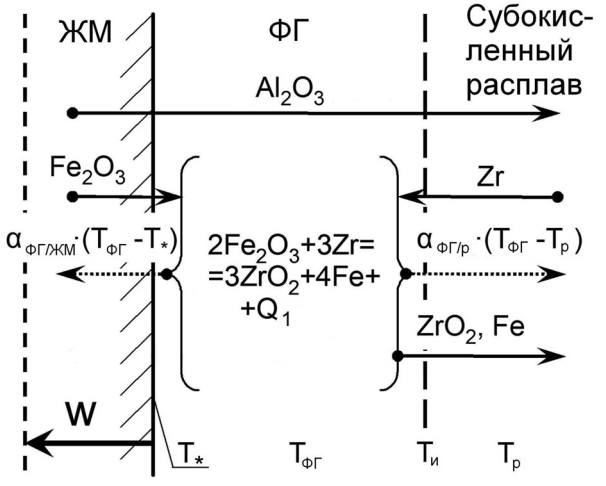

Рис.1 Схема взаимодействия ЖМ с субокисленным расплавом.

Так как коэффициенты конвективного теплообмена сильно зависят именно от теплопроводности среды, то для коэффициентов теплообмена в слоях жидкостей с разными теплопроводностями будут иметь место соотношения, подобные соотношениям между их теплопроводностями.

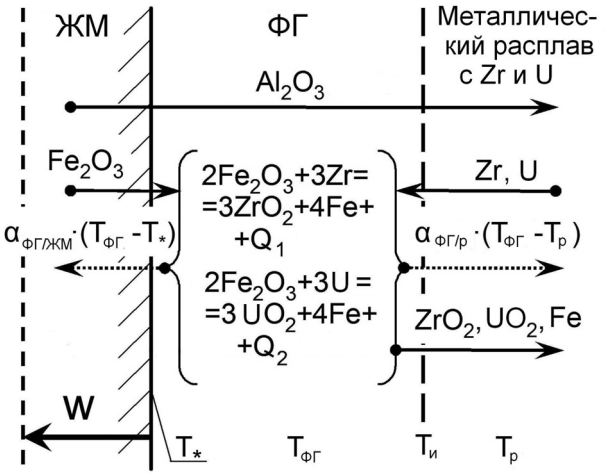

Рис.2 Схема взаимодействия ЖМ с металлическим расплавом, содержащим уран и цирконий.

Тогда для конвективного теплового потока, переносимого через границу раздела ФГ и расплава кориума можно записать следующее двойное равенство:

$$\alpha_{ФГ/р}\cdot\left(T_{ФГ}-T_р\right)=\alpha_{ФГ/и}\cdot\left(T_{ФГ}-T_и\right)=\alpha_{и/р}\cdot\left(T_и-T_р\right) \quad (1)$$

где $T_{ФГ}$, $T_р$, $T_и$ – температуры ФГ, расплава и интерфейса между ФГ и расплавом (далее просто “интерфейс”), соответственно, $\alpha_{ФГ/и}$, $\alpha_{и/р}$, $\alpha_{ФГ/р}$ – коэффициенты теплообмена между ФГ и интерфейсом, между интерфейсом и расплавом и непосредственно между ФГ и расплавом, соответственно (см. рис.1, 2).

Из (1) следуют известные выражения:

$$T_и=\frac{\alpha_{ФГ/и}T_{ФГ}+\alpha_{и/р}T_р}{\alpha_{ФГ/и}+\alpha_{и/р}} \quad (2)$$

$$\alpha_{ФГ/р}=\frac{\alpha_{ФГ/и}\alpha_{и/р}}{\alpha_{ФГ/и}+\alpha_{и/р}} \quad (3)$$

В [4] был рассмотрен случай взаимодействия ЖМ с субокисленным расплавом и, соответственно, было принято следущее соотношениями между коэффициентами теплообмена:

$$\alpha_{ФГ/и}>>\alpha_{и/р} \quad (4)$$

Из (4) следует:

$$\alpha_{ФГ/р}\approx\alpha_{и/р},\ T_и\approx T_{ФГ} \quad (5)$$

Понятно, что в случае взаимодействия ЖМ с металлическим расплавом, содержащим U и Zr, могут иметь место соотношения:

$$\alpha_{\Phi\Gamma/и} << \alpha_{и/р} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \alpha_{\Phi\Gamma/р} \approx \alpha_{\Phi\Gamma/и},\ T_и \approx T_Р \qquad (6)$$

В данной работе для описания теплообмена между ФГ и расплавом используется общие соотношения (2) и (3), что обусловливает получение общего решения.

Предполагая, как и в [4], что процесс установления стационарного состояния в пределах ФГ происходит много быстрее, чем во всём объёме расплава, получим для вещества в ФГ следующее уравнение сохранения тепла, записанное для единицы его поверхности:

$$\begin{aligned} &Q_1 + Q_2 = \alpha_{\Phi\Gamma/ЖМ}\cdot\left(T_{\Phi\Gamma} - T_*\right) + \\ &+ \alpha_{\Phi\Gamma/р}\cdot\left(T_{\Phi\Gamma} - T_р\right) + \\ &+ \left(c_{Al2O3}G_{Al2O3} + c_{Fe2O3}G_{Fe2O3}\right)\cdot\left(T_{\Phi\Gamma} - T_*\right) + \\ &+ \left(c_{Zr}G_{Zr} + c_U G_U\right)\cdot\left(T_{\Phi\Gamma} - T_р\right) \end{aligned} \qquad (7)$$

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

$$G_j = n_j G_{ЖМ},\quad j = Al2O3, Fe2O3 \qquad (8)$$

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

$$G_k = \gamma_k G_{ЖМ},\quad k = Zr, U \qquad (9)$$

где коэффициенты γ_k определяются стехиометрическими соотношениями, определяемыми из вида реакций (см. рис.1, 2):

$$\gamma_{Zr} = x^{(ЖМ)}_{Fe2O3}\cdot\frac{3M_{Zr}}{2M_{Fe2O3}}\cdot\frac{y_{Zr}}{y_{Zr}+y_U} \qquad (10)$$

$$\gamma_U = x^{(ЖМ)}_{Fe2O3}\cdot\frac{3M_U}{2M_{Fe2O3}}\cdot\frac{y_U}{y_{Zr}+y_U} \qquad (11)$$

$x^{(ЖМ)}_{Fe2O3}$ – массовая доля Fe_2O_3 в ЖМ, M_{Fe2O3}, M_{Zr}, M_U – молекулярные массы Fe_2O_3, Zr и U, соответственно, y_{Zr}, y_U– мольные концентрации или, как эквивалентный вариант, мольные количества циркония и урана, соответственно, в том или ином расплаве (для субокисленного расплава – y_U равно нулю, и γ_U при этом автоматически получается равным нулю). $Q_1 = r_{x,1}G_{ЖМ}$, $Q_2 = r_{x,2}G_{ЖМ}$ – тепловыделения за счёт химических реакций (см. рис.1, 2) в ФГ равны, где $r_{x,1}$, $r_{x,2}$ – тепловые эффекты реакций в расчёте на 1 кг ЖМ (для субокисленного расплава Q_2 полагается равным нулю).

Выражение для коэффициента теплообмена между интерфейсом и расплавом можно обобщённо представить в виде:

$$\begin{aligned} \alpha_{и/р} &= \alpha^{(*)}_{ЖМ/р}(\varphi, q_v)\cdot\left|\frac{T_и - T_р}{T_р - T_*}\right|^{1/m} = \\ &= \alpha^{(*)}_{ЖМ/р}(\varphi, q_v)\cdot|y-1|^{1/m} \end{aligned} \qquad (12)$$

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

$$y = \frac{T_и - T_*}{T_р - T_*} = \frac{\Delta T_и}{\Delta T_р} \qquad (13)$$

– безразмерная температура интерфейса, а $\alpha^{(*)}_{ЖМ/р}(\varphi, q_v)$ – коэффициент теплообмена между расплавом и поверхностью ЖМ в случае отсутствия ФГ. $\alpha^{(*)}_{ЖМ/р}(\varphi, q_v)$ 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.

Для коэффициента теплообмена между ФГ и ЖМ использовано выражение, применённое в [4]:

$$\alpha_{\Phi\Gamma/ЖМ} = \alpha^{(*)}_{\Phi\Gamma}(\varphi)\cdot Y^{1/3} \qquad (14)$$

где $Y = \dfrac{T_{\Phi\Gamma} - T_*}{T_р - T_*} = \dfrac{\Delta T_{\Phi\Gamma}}{\Delta T_р}$ (15)

– безразмерная температура ФГ,

$$\begin{aligned} \alpha^{(*)}_{\Phi\Gamma} &= C_{\Phi\Gamma}\cdot\left(\frac{r_{x,1}+r_{x,2}}{r_{ЖМ}}\right)^{1/3}\times \\ &\times\left[\frac{c_{\Phi\Gamma}\left(\rho_{\Phi\Gamma}\lambda_{\Phi\Gamma}\right)^2\beta_{\Phi\Gamma}\Delta T_р\ g\cdot\cos(\varphi)}{\mu_{\Phi\Gamma}}\right]^{1/3} \end{aligned} \qquad (16)$$

$C_{\Phi\Gamma}$ – эмпирический безразмерный коэффициент; $r_{ЖМ}$ – тепло, необходимое для плавления и нагрева единицы массы ЖМ от его начальной температуры до T_*; $c_{\Phi\Gamma}$, $\rho_{\Phi\Gamma}$, $\lambda_{\Phi\Gamma}$, $\beta_{\Phi\Gamma}$, $\mu_{\Phi\Gamma}$ – удельная теплоёмкость, плотность, теплопроводность, коэффициент объёмного термического расширения и динамическая вязкость расплава в пределах ФГ, соответственно; g – ускорение свободного падения.

Для коэффициента теплообмена между ФГ и интерфейсом можно применить выражение, подобное (14), но построенное по другому температурному перепаду:

$$\begin{aligned} \alpha_{\Phi\Gamma/и} &= \alpha^{(*)}_{\Phi\Gamma}(\varphi)\cdot\left|\frac{T_{\Phi\Gamma} - T_и}{\Delta T_р}\right|^{1/3} = \\ &= \alpha^{(*)}_{\Phi\Gamma}(\varphi)\cdot|Y-y|^{1/3} \end{aligned} \qquad (17)$$

Введя безразмерное обозначение

$$a_1 = \left(\frac{\alpha^{(*)}_{ЖМ/р}}{\alpha^{(*)}_{ФГ}} \right) \quad (18)$$

и используя равенство теплового потока, подводимого от ФГ к интерфейсу, и потока, отводимого от интерфейса к расплаву, (второе равенство (1)) можно получить связь между безразмерными переменными y и Y:

$$Y = y + a_1^{3/4} \cdot \mathrm{sign}(y-1) \cdot |y-1|^{\frac{3(m+1)}{4m}} \quad (19)$$

Введём характеризующие процесс ЖФГ: 1) безразмерный параметр:

$$a_2 = \frac{r_{ЖМ}}{\Delta T_p \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_{ЖМ}} (ЖМ) c_j n_j + \sum_{k=1}^{N_p} (p) c_k \gamma_k \right)} \quad (20)$$

представляющего собой соотношение затрат тепла на подогрев ЖМ от температуры внешней среды до температуры T_*, на разложение/расплавление ЖМ и затрат тепла на подогрев веществ, поступающих в ФГ, от температуры T_* до температуры расплава (T_p), и 2) безразмерный аргумент:

$$x = \frac{r_{x,1} + r_{x,2} - r_{ЖМ} - \Delta T_p \cdot \sum_{j=1}^{N_{ЖМ}} (ЖМ) c_j n_j}{\Delta T_p \cdot \left(\sum_{j=1}^{N_{ЖМ}} (ЖМ) c_j n_j + \sum_{k=1}^{N_p} (p) c_k \gamma_k \right)} \quad (21)$$

представляющий собой безразмерный суммарный тепловой эффект химических реакций в ФГ за вычетом затрат тепла на разложение/расплавление и подогрев компонентов ЖМ от температуры внешней среды до температуры расплава (T_p).

Подставим выражения (3), (8), (9), (12), (14) и (17) в уравнение сохранения энергии (7) и, используя безразмерные обозначения (13), (15), (18), (20) и (21) получим основное уравнение, описывающее ЖФГ в рассматриваемых условиях в безразмерном виде:

$$x = Y - 1 + (a_1 a_2) \cdot r_{a_1,m}(y) \cdot \frac{|y-1|^{1/m}(Y-1)}{Y^{4/3}} \quad (22)$$

где $$r_{a_1,m}(y) = 1 \Big/ \left(1 + \frac{a_1^{3/4}}{|y-1|^{\frac{m-3}{4m}}} \right) \quad (23)$$

Полученная система уравнений (19), (22) и (23) при произвольном значении параметров m, a_1 и a_2 не разрешима явно в виде $Y = Y_{m,a_1,a_2}(x)$, поэтому в рамках применения предлагаемой модели ЖФГ в расчётных кодах, эту систему уравнений следует решать численно.

Вычислив безразмерную температуру ФГ (Y), можно определить и скорость абляции ЖМ (W). Тепло, подводимое от ФГ к ЖМ, тратится на подогрев ЖМ от температуры внешней среды до температуры T_* и на расплавление ЖМ:

$$r_{ЖМ} \rho_{ЖМ} W = \alpha_{ФГ/ЖМ} \cdot (T_{ФГ} - T_*) = \alpha^{(*)}_{ФГ} \cdot \Delta T_p \cdot Y^{4/3} \quad (24)$$

Откуда следует выражение для скорости абляции ЖМ:

$$W = \frac{\alpha^{(*)}_{ФГ} \cdot \Delta T_p \cdot Y^{4/3}}{r_{ЖМ} \rho_{ЖМ}} \quad (25)$$

В ходе верификации предложенной модели ЖФГ были повторно обработаны существующие экспериментальные данные по взаимодействию расплава кориума и ЖМ [5]. Кроме того, были уточнены: 1) теплофизические свойства чистых веществ, участвующих во взаимодействии расплава коруима и ЖМ, при высоких температурах и 2) методики расчёта свойств двухфазных смесей/расплавов. В результате было получено новое значение безразмерного коэффициента $C_{ФГ}$ для субокисленных расплавов:

$$C_{ФГ} = 0{,}31 \quad (26)$$

не зависящее от концентрации неокисленного циркония в расплаве. Для взаимодействия ЖМ и содержащего уран и цирконий металлического расплава величина этого коэффициента оказалась существенно зависящей от концентрации восстановителей в расплаве:

$$C_{ФГ} = \max\left(0{,}333\, x^{1/3} - 3{,}010\, x^3, 0 \right) \quad (27)$$

где $$x = x_U + 0{,}3336\, x_{Zr} \quad (28)$$

x_U, x_{Zr} – массовые доли U и Zr в расплаве, соответственно. При этом отклонение расчётных величин W от экспериментальных значений не превышает ±13 и ±25% для субокисленного и металлического расплава, соответственно.

Разработанная математическая модель применена в коде CORCAT [6], используемого для расчётов процессов, происходящих в устройствах локализации тигельного типа. В настоящее время с использованием данного компьютерного кода, и соответственно, разработанной математической модели взаимодействия расплава с ЖМ производятся расчёты процессов, происходящих в ловушках расплава при гипотетических тяжёлых авариях на АЭС новых проектов.

АПЕРИОДИЧЕСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА КОРИУМА И ЖМ

В [4] было показано, что возможно возникновение апериодической неустойчивости ЖФГ, связанной с многозначностью решения системы уравнений, когда одному значению безразмерного аргумента x соответствует более одного (до трёх) значений безразмерной температуры ФГ и скорости абляции. Как показало численное исследование для общего случая теплообмена между ФГ и расплавом, рассмотренного в настоящей работе, возможность возникновения апериодической неустойчивости сохраняется и в этом, более общем случае. Расчётные границы области неустойчивости приведены на рис.3 для разных значений параметра m, характеризующего теплообмен между расплавом и интерфейсом. Область неустойчивости лежит выше этой границы. Видно, что с увеличением m область возможной неустойчивости увеличивается и при $m \to +\infty$ максимальна. Это значение m соответствует теплообмену расплава имеющего внутренне тепловыделение (например, за счёт остаточного энерговыделения в кориуме). При $m \le 3$ область неустойчивости полностью исчезает. (Случай m=3 соответствует обычному свободноконвективному теплообмену жидкости без внутреннего тепловыделения.)

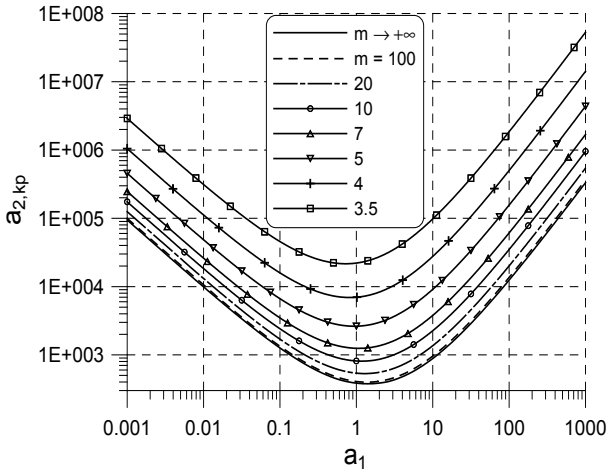

Рис.3 Границы области апериодической неустойчивости.

ВЫВОДЫ

- Разработана математическая модель процесса ЖФГ, имеющего место при взаимодействии как расплава субокисленного кориума, так и содержащего уран и цирконий металлического расплава с имеющим значительный окислительный потенциал ЖМ.
- Математическая модель верифицирована с использованием существующих экспериментальных данных по взаимодействию ЖМ с расплавом кориума.
- Разработанная математическая модель применена в коде CORCAT, используемого для расчётов процессов, происходящих в устройствах локализации тигельного типа.
- Численно определены границы области возможной апериодической неустойчивости процесса ЖФГ.

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 International 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. Granovsky V.S, Sulatsky A.A., Khabensky V.B. et al. Modeling of Melt Retention in EU-APR1400 Ex-Vessel Core Catcher // Procideengs of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 12), June 24-28, 2012 – Chicago, USA – Paper 12348.
4. Сулацкий А.А. Математическая модель жидкофазного горения циркония // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. НПВК “Триакон”: №2(10), 2012, С.3-9. Sulatskiy A.A. Mathematical model of zirconium liquid-phase burning // Modern science: researches, ideas, results,

technologies. Collection of research papers. SPIC “Triacon”: #2(10), 2012, P.3-9.

5. Бешта С.В., Хабенский В.Б., Грановский В.С. и др. Взаимодействие оксидного жертвенного материала устройства локализации с расплавом кориума при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмены, Россия, Москва, 25-29 окстября, 2010, Т.1. Beshta S.V., Khabenskiy V.B., Granivskiy V.S. et al. Interaction between oxidic ДИНАМИКА ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В СОЛЕНОИДАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ sacrificial material of core catcher and molten corium in severe accident of NPP with WWER // Proceedings of the 5-th Russian Conference on Heat Transfer, Russia, Moscow, October 25-29, 2010, V.1.
6. Бешта С.В., Витоль. С.А., Грановский В.С. и др. Формирование ванны расплава активной зоны ядерного реактора в ловушке тигельного типа для АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика, 2011, 5, С.61-65. Beshta S.V., Vitol S.A., Granovskiy V.S. et al. Formation of molten pool into crucible type core catcher for NPP with WWER // Thermal Engineering, 2011, 5, P.61-65.

© Сулацкий А.А.