

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

АННОТАЦИЯ

Предложена математическая модель процессов удержания расплава в корпусе быстрого реактора при разрушении тепловыделяющих сборок. Рассматриваемая расчетная область является многосвязной и включает в себя 15 подобластей. Математическое моделирование подобластей как пористых тел выполнено с использованием законов сохранения массы, импульса и энергии, записанных в виде уравнений неразрывности, движения и энергии в двумерной цилиндрической системе координат. Получены соотношения для определения времени формирования тепловыделяющего слоя и его толщины. Определены стоки тепла в зоне с теплообменниками. Разработанная расчетная модель реализована в виде кода БРУТ. По программе БРУТ проведено расчетное исследование удержания расплавленного топлива в корпусе быстрого реактора при разрушении 36 тепловыделяющих сборок, а также при полном плавлении активной зоны.

1. ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемой работе исследуется возможность удержания расплава в корпусе реактора при тяжелой аварии.

Расплавление ТВС приводит к образованию тепловыделяющего слоя, расположенного на нижнем торцевом экране. В результате теплового взаимодействия расплавленного топлива с натрием часть топлива и стали в виде частиц рассеивается в объеме смесительной камеры реактора, а затем оседает на нижнем торцевом экране и ТВС боковой зоны воспроизводства (БН-600) или сборках стальной защиты (БН-600 с гибридной активной зоной). Соответственно в рамках разработанной математической модели процессов удержания расплавленного топлива в корпусе быстрого реактора при тяжелой аварии решена задача осаждения частиц топлива и стали.

Моделирование тепловыделяющего слоя рассматривалось в ряде работ. Липинским была разработана стационарная одномерная модель [1], которая не решала основной проблемы удержания расплавленного топлива. Представленная ниже модель решает ее и разработана впервые.

В данной работе приведено описание результатов расчета удержания расплавленного топлива в реакторе БН-600 с гибридной активной зоной с виброуплотненным МОХ-топливом для случаев частичного и полного разрушения активной зоны.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА В КОРПУСЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

2.1. Постановка задачи

Рассматриваемая расчетная область является сложной и включает в себя 15 подобластей [2]. Моделируются тепловыделяющий слой, слой натрия над тепловыделяющим слоем, нижний торцевой экран, “газовая полость”, коллекторы-модули, напорная камера, радиальная защита, промежуточный теплообменник, окруженный натрием, слой, содержащий корпус реактора и страховочный корпус, опорный пояс, проводящий слой неразрушившихся ТВС боковой зоны воспроизводства или сборок стальной защиты, внутрикорпусная нейтронная защита, другие внутриреакторные конструкции.

Математическое моделирование подобластей как пористых тел осуществляется с использованием законов сохранения массы, импульса и энергии, записанных в виде уравнений неразрывности, движения и энергии в двумерной цилиндрической системе координат, которые решаются с соответствующими краевыми условиями.

Исходная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии представлена ниже [3].

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \rho v_r \varepsilon r + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \varepsilon = 0. \quad (1)$$

Уравнения движения теплоносителя в пористом теле:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = & -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} - A_z^0 \rho |v|^{1-n} v_z + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{eff} \cdot r \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(2 \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{v} \right) \right]; \\ \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial \tau} + b v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + b v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial p}{\partial r} - A_r^0 \rho |v|^{1-n} v_r + \\ & + \frac{\partial}{\partial r} 2 \mu_{eff} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{r} 2 \mu_{eff} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \mu_{eff} \operatorname{div} \vec{v}. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение энергии для теплоносителя в пористом теле:

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{eff,r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{eff,z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v + Q. \end{aligned} \quad (3)$$

Для твердых тел записывается уравнение нестационарной теплопроводности

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (4)$$

Краевые условия для системы уравнений (1)-(4) приведены в [2].

Укажем, что решается задача Стефана при плавлении конструкций: нижнего торцевого экрана, стали “газовой полости”, коллекторов-модулей, верхней плиты напорной камеры и других. На фронте плавления задается температура плавления стали и записывается условие для определения положения фронта плавления в любой момент времени:

$$\begin{aligned} T_1 = T_2 = T_{m,st}; \\ \varepsilon_{st} \rho_2 L_{m,st} \frac{\partial \xi}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}; \\ \varepsilon_{st} \rho_2 L_{m,st} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}. \end{aligned}$$

Отметим также, что n в уравнениях движения является функцией числа Рейнольдса: $n=0$ при ламинарном течении и $n \approx 0.25$ при турбулентном течении. Коэффициент анизотропии инерционных сил $b \approx 2 - \varepsilon$, ε — пористость пучка.

2.2. Моделирование тепловыделяющего слоя

Рассмотрим сначала формирование тепловыделяющего слоя.

Пусть в некоторый момент времени, который принимаем за нулевой, в объеме $V = \pi R^2 (H - h_0)$ распределены с постоянной концентрацией c частицы топлива и стали радиусом r_0 , суммарная масса которых равна M , а эффективная плотность ρ :

$$c = \frac{M(1 - \delta - \delta_0)}{\pi R^2 (H - h_0) \rho}.$$

Определим скорость движения (оседания при $\rho > \rho_f$ и подъема при $\rho < \rho_f$) частиц. На основании второго закона Ньютона для частицы можно получить уравнение

$$\frac{dw}{d\tau} + aw^2 = b, \quad (5)$$

где

$$a = \frac{3}{8} C_\mu \frac{c(1-c)}{r_0}, \quad b = g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right),$$

C_μ определяется в соответствии с [4] следующим образом:

$$\begin{aligned} C_\mu = \frac{24}{Re} \quad \text{при } Re < 2 \quad \text{и} \\ C_\mu = 48 \left(1 - \frac{2.2}{\sqrt{Re}} \right) \frac{1}{Re} \quad \text{при } Re \geq 2, \end{aligned}$$

где $Re = \frac{2r_0 |w|}{\nu}$ — число Рейнольдса.

Постулируем, что начальное условие для уравнения (5)

$$w(0) = 0 \quad (6)$$

является несущественным приближением для оценки τ_0 .

Уравнение (5) с разделяющимися переменными и с условием (6) имеет решение

$$\begin{aligned} w(\tau) = \frac{b}{\sqrt{ab}} \operatorname{th}(\sqrt{ab}\tau) \quad \text{при } \rho > \rho_f (ab > 0) \quad \text{и} \\ w(\tau) = \frac{b}{\sqrt{-ab}} \operatorname{th}(\sqrt{-ab}\tau) \quad \text{при } \rho < \rho_f (ab < 0). \end{aligned} \quad (7)$$

В любой момент времени скорости всех частиц одинаковы. Поэтому время образования слоя τ_0 найдем из условия прохождения частицами, находящимися на высоте H , расстояния $H-h$.

Для рассматриваемого случая $\rho_f < \rho$ и поэтому используем первую формулу (7):

$$H - h = \frac{b}{\sqrt{ab}} \int_0^{\tau_0} \operatorname{th}(\sqrt{ab}\tau) d\tau = \frac{1}{a} \operatorname{lnch}(\sqrt{ab}\tau_0).$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \tau_0 = \frac{1}{\sqrt{ab}} \operatorname{Arch}(e^{a(H-h)}) = \\ = \frac{1}{\sqrt{ab}} \operatorname{ln}[e^{a(H-h)} + \sqrt{e^{2a(H-h)} - 1}]. \end{aligned}$$

При $a(H-h) \gg 1$ (что выполняется) получим

$$\tau_0 = \frac{\ln 2 + a(H-h)}{\sqrt{ab}}. \quad (8)$$

Если пористость натрия в слое осевших частиц равна ε , то толщина слоя h_1 равна

$$h_1 = \frac{(H-h_0)c}{1-\varepsilon}. \quad (9)$$

Подстановка (9) в (8) дает

$$\tau_0 = \frac{\ln 2 + a \left(H - \frac{(H-h_0)c}{1-\varepsilon} \right)}{\sqrt{ab}}.$$

Далее остановимся на ряде аспектов моделирования зон тепловыделяющего слоя.

Сформировавшийся слой пропитан натрием. В процессе выделения остаточного тепла в топливе слой будет разогреваться. В слое может возникнуть естественная конвекция. Если тепловыделение превышает возможности теплоотвода, достигается температура кипения натрия и возникает зона кипящего натрия. По мере выкипания натрия появляется осушенная зона. Так как теплопроводность пористого слоя мала, его температура может достигать температуры плавления стали и затем топлива, соответственно образуется зона плавления. С течением времени сталь в слое может закипеть, что приводит к возникновению зоны кипения стали.

В данной работе используется понятие эффективной теплоемкости для всех состояний, присущих системе. Эффективная теплоемкость выражается по формуле Н.И. Никитенко [5]:

$$c_{eff} = c \text{ при } T \notin [T_S, T_L] \text{ и}$$

$$c_{eff} = c + \frac{2}{3} \frac{L + c_p(T_L - T_S)}{(T_L - T)^{1/3}(T_L - T_S)^{2/3}} \text{ при } T \in [T_S, T_L].$$

Плавление частиц стали, а затем топлива учитывается путем введения стоков тепла в тепловыделяющем слое [6]. Аналогично определяются стоки тепла при плавлении твердых частиц топлива.

2.3. Учет процессов кипения и конденсации

Пузыри стали конденсируются непосредственно у поверхности раздела тепловыделяющий слой – натрий. Тепло, которое высвобождается при конденсации пузырей стали, идет на испарение натрия.

Учет кипения натрия и стали в тепловыделяющем слое, натрия вне слоя выполнен в соответствии с работой авторов [2]. Отметим также, что, рассчитав количество теплоты, которое идет на кипение жидкости на данном шаге по времени, можно легко найти массу испарившейся на шаге по времени жидкости.

Образовавшиеся пузыри натрия всплывают вверх и частично конденсируются в более холодном натрии. Можно оценить время до конденсации пузыря натрия и затем расстояние от тепловыделяющего слоя до места конденсации пузыря [2].

Для учета тепла при конденсации паров натрия определяется количество теплоты, которое идет на кипение стали в тепловыделяющем слое на данном шаге по времени, и рассчитываются источники тепла при конденсации паров натрия с учетом утечки паров натрия наружу.

2.4. Определение замыкающих коэффициентов

Стоки тепла в зоне с теплообменниками

$$q_{v,c} = - \frac{\rho_c w c_p \Delta T_c}{\Delta z_c}.$$

Эмпирические функции и коэффициенты ξ_z, ξ_r и V_{eff} , замыкающие систему уравнений гидродинамики пористого тела, были получены из многочисленных и разнообразных опытных данных разных авторов [7].

Для решения задачи используется неявный метод решения уравнений Навье-Стокса в естественных переменных (метод В.К. Артемьева – Н.И. Булева), разработанный в ГНЦ РФ-ФЭИ [8].

Предложенная расчетная модель реализована в виде кода БРУТ (Быстрый реактор. Удержание топлива.) [2].

3. РАСЧЕТ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ

По программе БРУТ выполнен расчет сценария аварии, при котором расплавляются 36 ТВС. Начальное состояние слоя характеризуется температурой, принятой равной 3300 К. Время с момента начала аварии равно 60 с. Расход натрия второго контура через теплообменник “натрий-натрий” в первом случае составляет 100 %, а во втором – 30 % от номинального расхода $G = 1000$ кг/с.

Тепловыделяющий слой может плавить ТВС, граничащие с ним. Боковое плавление моделируется путем решения задачи Стефана. Условия Стефана реализуются на границе слой – ТВС.

Фактически имеет место непрерывный “дождь” мелких горячих капель стали. Попадая в слой, они захватываются бурлящим потоком и перемешиваются. Таким образом, твердая корка сверху слоя не образуется.

При расплавлении 36 ТВС сначала происходит плавление нижнего торцевого экрана, которое затем прекращается. Максимальная глубина проплавления нижнего торцевого экрана составляет 0.3 м. Проплавление сборок в радиальном направлении за 2.5 ч достигает примерно 0.07 м.

На рис. 1 показана зависимость расхода натрия через реактор от времени.

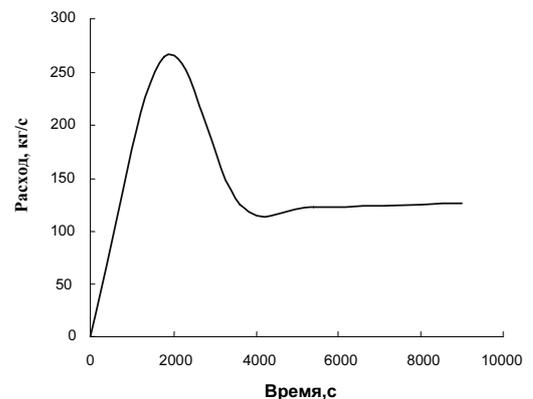


Рис. 1. Изменение расхода натрия через реактор во времени (расплавилось 36 ТВС)

По результатам расчетов по программе БРУТ можно сделать вывод о том, что не происходит разрушения напорного коллектора. Следовательно, можно утверждать, что при разрушении 36 ТВС расплавленное топливо удерживается в реакторе.

Расчет процесса удержания расплавленного топлива в корпусе реактора выполнен также при полном плавлении активной зоны. В начальном состоянии на нижнем торцевом экране расположена треть массы топлива и стали активной зоны и верхний торцевой экран. В последующем процессе треть массы топлива и стали активной зоны оседает в виде частиц в сборках стальной защиты, остальная масса осаждается вниз, наращивая слой на нижнем торцевом экране. Время осаждения частиц составило примерно 1 мин.

В соответствии с результатами расчетов происходит полное плавление нижнего торцевого экрана. Время расплавления экрана равно 14500 с. Поле температуры для момента времени 10800 с приведено на рис. 2. С течением времени имеет место продвижение “холодного” фронта в направлении тепловыделяющего слоя.

В дальнейшем происходит медленное плавление коллекторов – модулей, которое практически прекращается к моменту времени примерно 137000 с.

С течением времени охлаждение, обусловленное действием стоков тепла в теплообменниках, начинает проявляться все в большей степени. На рис. 3

представлено сопоставление энерговыделения с мощностью теплоотвода во второй контур. Видно, что при больших временах мощность теплоотвода начинает превышать остаточное энерговыделение, что приводит к прекращению плавления внутриреакторных конструкций.

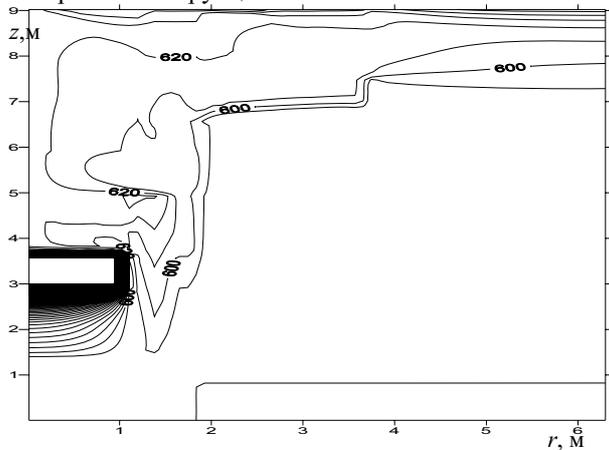


Рис. 2. Поле температуры в момент времени $\tau = 10800$ с

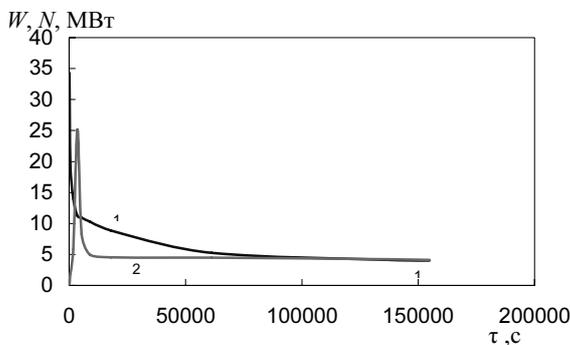


Рис. 3. Изменение энерговыделения W и отводимой во второй контур мощности N во времени: 1 – энерговыделение; 2 – мощность теплоотвода

Таким образом, при заданных параметрах не происходит разрушения верхней плиты напорной камеры. Фронт плавления стабилизируется, и тепловыделяющий слой начинает остывать. Таким образом, обеспечивается удержание разрушенной активной зоны в корпусе реактора без его проплавления.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена математическая модель процессов удержания расплава в корпусе быстрого реактора при тяжелой аварии.
2. Впервые решена задача формирования тепловыделяющего слоя на нижнем торцевом экране.
3. Разработанная расчетная модель реализована в виде кода БРУТ.
4. Результаты расчетов показали, что расплавленное топливо удерживается в корпусе реактора.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

A_z^0, A_r^0 – компоненты тензора объемного сопротивления,
 $\frac{m^{n-1}}{c^n}$;

c – относительная концентрация;

c_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);

G – расход, кг/с;

h – толщина слоя, м;

L – теплота фазового перехода, Дж/кг;

p – давление, Па;

Q – источники (стоки) при изменении агрегатного состояния компонент и стоки тепла в зоне с теплообменниками, Вт/м³;

Q_v – плотность объемного тепловыделения, Вт/м³;

r – поперечная координата, м;

T – температура, К;

T_S – температура солидуса, К;

T_L – температура ликвидуса, К;

ΔT_c – подогрев теплоносителя на длине ячейки, К;

U – скорость теплоносителя, м/с;

U_z, U_r – продольная и поперечная компоненты скорости, м/с;

w – скорость движения частиц и фильтрационная скорость теплоносителя, м/с;

z – продольная координата, м;

δ – доля осевших частиц;

δ_0 – доля частиц, не попавших в слой;

ε – пористость;

η – продольная координата точек фронта плавления, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

ξ – поперечная координата точек фронта плавления, м,

и коэффициент гидравлического сопротивления;

ρ – плотность, кг/м³;

τ – время, с.

Индексы:

c – ячейка;

eff – эффективный;

f – жидкость;

m – плавление;

st – сталь;

o – начальный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lipinski R.J.** A coolability model for postaccident nuclear reactor debris // Nuclear Technology. 1984. Vol. 65. № 1. P. 53-66.
2. **Kascheev M.V., Kuznezov I.A.** Computation analysis of fuel melt confinement processes in fast reactors // International Conference on Fifty Years of Nuclear Power - the Next Fifty Years. Obninsk, Russian Federation, 27 June – 2 July 2004. Paper IAEA-CN-114/35p.
3. **Субботин В.И. и др.** Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. М.: Атомиздат, 1979. 144 с.
4. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. Т.1. М.: Наука. 1987. 464 с.
5. **Никитенко Н.И.** Теория тепломассопереноса. Киев: Наукова думка, 1983. 320 с.
6. **Касеев М.В.** Моделирование стратификации компонента корнума при тяжелой аварии // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2002. № 3. С. 3-13.
7. **Проектирование** теплообменных аппаратов АЭС/ Ф.М. Митенков, В.Ф. Головкин и др.; Под ред. Ф.М. Митенкова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 296 с.
8. **Артемьев В.К.** Вариант неявного метода для решения системы уравнений Навье-Стокса в естественных переменных / Препринт № 1962. Обнинск: ГИЦ РФ-ФЭИ, 1989. 22 с.