

УДК 621.039.586

МОДЕЛИРОВАНИЕ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА В КОРПУСЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

М. В. Кашеев, И. А. Кузнецов
(ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск)

Разработана математическая модель процессов удержания расплава в корпусе быстрого реактора при разрушении тепловыделяющих сборок.

Разработанная расчетная модель реализована в виде программы БРУТ. С ее использованием проведено расчетное исследование удержания расплавленного топлива в корпусе быстрого реактора при разрушении 6 и 36 тепловыделяющих сборок, а также при полном плавлении активной зоны. На основании проведенного расчетного анализа можно утверждать, что обеспечивается удержание разрушенной активной зоны в корпусе реактора без его проплавления.

Введение

В случае тяжелых запроектных аварий в быстрых реакторах с натриевым охлаждением возникает возможность расплавления активной зоны (АЗ). Если АЗ реактора полностью или частично расплавлена, дальнейшая эволюция аварийного процесса может закончиться либо сохранением корпуса реактора или его страховочного кожуха, либо проплавлением стенок. Возможность отвода остаточного энерговыделения в осколках разрушенных твэлов и удержания расплава в корпусе реактора исследуется в настоящей работе.

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 АЗ). 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. Р. Липинским была разработана стационарная одномерная модель [1], предназначенная для прогнозирования начала осушения в зоне кипения теплоносителя и ограниченная рассмотрением структуры тепловыделяющего слоя. В работах ГНЦ РФ-ФЭИ и ОКБМ описываются модели, в той или иной степени улучшающие модель Липинского, но они также не решают основной проблемы удержания расплавленного топлива. Представленная ниже модель отвечает на вопрос относительно возможности удержания расплавленного топлива и разработана впервые.

В данной статье приведено описание результатов расчета удержания расплавленного топлива в реакторе БН-600 с гибридной АЗ с виброуплотненным МОХ-топливом для случаев частичного и полного разрушения АЗ. При частичном расплавлении топлива по программе БРУТ выполнены расчеты двух сценариев. В первом случае предполагается, что расплавилось 6 ТВС, окружающих центральный компенсирующий стержень (КС), во втором случае — 36 ТВС, т. е. 4 ряда ТВС в центре АЗ вокруг центрального КС. Расчет процесса удержания расплавленного топлива в корпусе реактора выполнен также для более консервативного энергетического сценария развития запроек-

ной аварии, в котором предполагается полное плавление АЗ в результате возникновения вторичной критичности на мгновенных нейтронах.

Список обозначений

- A_z^0, A_r^0 — компоненты тензора объемного сопротивления, $\text{м}^{n-1}/\text{с}^n$;
 c — относительная концентрация;
 c_p — изобарная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 G — расход, $\text{кг}/\text{с}$;
 g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;
 h — толщина слоя, м ;
 L — теплота фазового перехода, $\text{Дж}/\text{кг}$;
 l — длина трубки, м ;
 p — давление, Па ;
 Q — источники (стоки) при изменении агрегатного состояния компонентов и стоки тепла в зоне с теплообменниками, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
 Q_V — плотность объемного тепловыделения, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
 R — радиус, м ;
 r, z — поперечная и продольная координаты соответственно, м ;
 S — площадь "кольца" теплообменника, м^2 ;
 T — температура, К ;
 T_S, T_L — соответственно температура солидуса и ликвидуса, К ;
 ΔT_c — подогрев теплоносителя на длине ячейки, К ;
 $v, |v|, v_z, v_r$ — скорость теплоносителя, модуль скорости, ее продольная и поперечная компоненты соответственно, $\text{м}/\text{с}$;
 w — скорость движения частиц и фильтрационная скорость теплоносителя, $\text{м}/\text{с}$;
 δ, δ_0 — доля осевших частиц и частиц, не попавших в слой, соответственно;
 ε — пористость;
 η — продольная координата точек фронта плавления и координата точек фронта плавления "крупинки", м ;
 ξ — поперечная координата точек фронта плавления (м) и коэффициент гидравлического сопротивления;
 λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
 μ — коэффициент динамической вязкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$;
 ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 τ — время, с .
 Индексы:
 c — ячейка;
 ef — эффективный;
 f — жидкость;
 m — плавление;
 mix — смесь;
 st — сталь;
 t — трубка;
 0 — начальный.

Математическая модель процессов удержания расплава в корпусе быстрого реактора в условиях тяжелой аварии

Рассматриваемая расчетная область является сложной и включает в себя 15 подобластей (рис. 1). Моделируются: • тепловыделяющий слой; • слой натрия над тепловыделяющим слоем; • ниж-

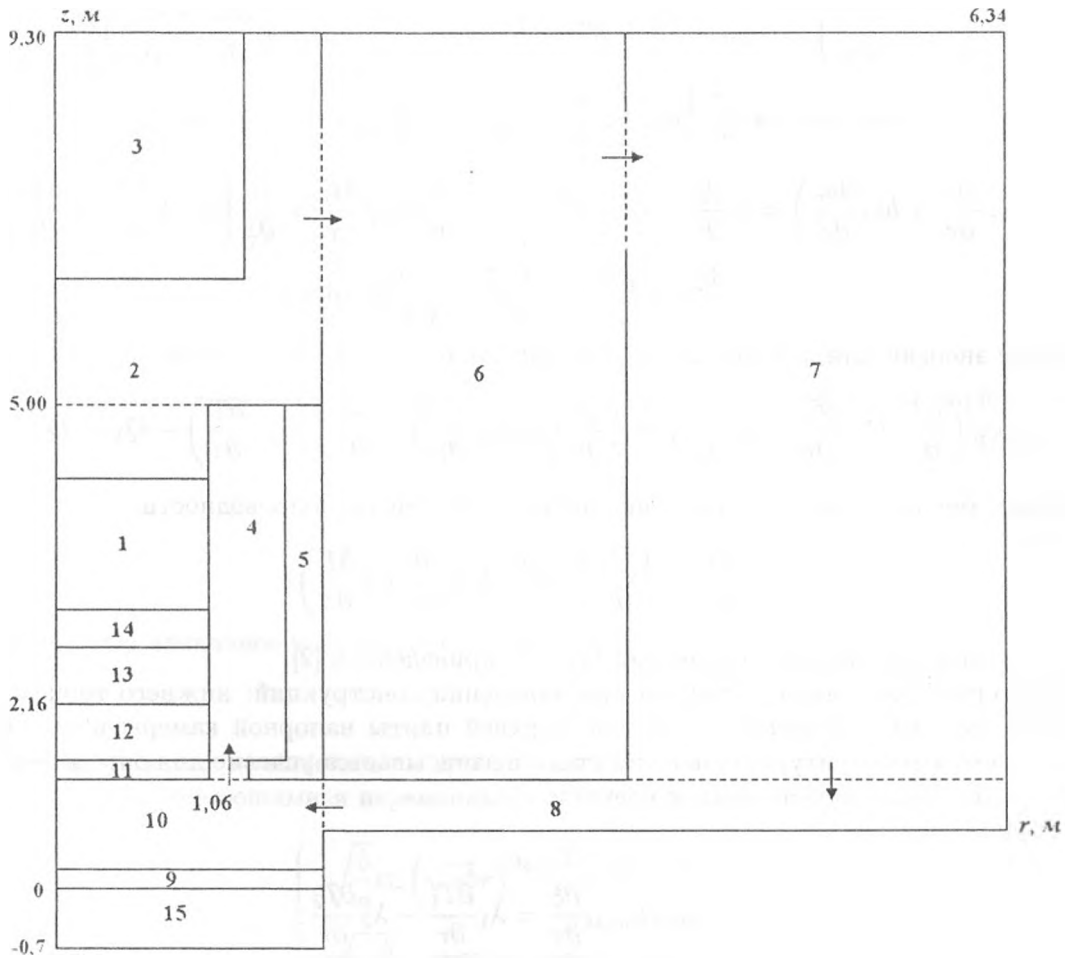


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 — тепловыделяющий слой; 2 — натрий над тепловыделяющим слоем; 3 — центральная поворотная колонна; 4 — зона, содержащая неразрушившиеся сборки стальной защиты; 5 — нейтронная подпорка; 6 — радиальная защита; 7 — зона с теплообменниками и насосами первого контура; 8 — имитация напорных трубопроводов; 9 — нижняя плита напорной камеры; 10 — напорная камера; 11 — верхняя плита напорной камеры; 12 — слой коллекторов-модулей; 13 — газовая полость; 14 — нижний торцевой экран; 15 — внутрикорпусная нейтронная защита

ний 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.

Помимо указанных подобластей, на схеме рис. 1 показаны фиксированные радиальные координаты отдельных зон и некоторые аксиальные координаты.

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 [1]:

— 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:

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

— уравнение энергии для теплоносителя в пористом теле:

$$\varepsilon \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{ef,r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{ef,z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_V + Q. \quad (3)$$

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 др. 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.

Моделирование тепловыделяющего слоя

Прежде чем моделировать тепловыделяющий слой, необходимо его сформировать.

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 . Тогда, очевидно, для концентрации c получим

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

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

$$\Delta m \frac{dw}{d\tau} = \sum_i F_i,$$

где $\sum_i F_i$ — сумма сил, действующих на частицу.

В рассматриваемом случае учтем силы:

— Архимеда: $F_A = g \rho_f \Delta V$;

– тяжести: $F_g = g\rho\Delta V$;

– сопротивления: $F_\mu = C_\mu \pi r_0^2 \frac{\rho w^2}{2} c(1-c)$.

Отметим, что коэффициент сопротивления C_μ определяется в соответствии с [3] следующим образом:

$$C_\mu = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}} & \text{при } \text{Re} < 2; \\ 48 \left(1 - \frac{2,2}{\sqrt{\text{Re}}}\right) \frac{1}{\text{Re}} & \text{при } \text{Re} \geq 2, \end{cases}$$

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

Учитывая знаки сил и соотношение $\Delta m = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho$, получаем уравнение для определения скорости w :

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

где

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

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 условием (6) имеет решение

$$w(\tau) = \begin{cases} \sqrt{\frac{b}{a}} \text{th}(\sqrt{ab}\tau) & \text{при } \rho < \rho_f \quad (ab > 0); \\ \sqrt{-\frac{b}{a}} \text{th}(\sqrt{-ab}\tau) & \text{при } \rho > \rho_f \quad (ab < 0). \end{cases} \quad (7)$$

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

$$H - h = \int_0^{\tau_0} w(\tau) d\tau.$$

Для рассматриваемого случая $\rho_f < \rho$, поэтому используем вторую формулу из (7):

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

Отсюда

$$\tau_0 = \frac{1}{\sqrt{-ab}} \text{Arch}(e^{a(H-h)}) = \frac{1}{\sqrt{-ab}} \ln(e^{a(H-h)} + \sqrt{e^{2a(H-h)} - 1}).$$

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

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

Далее остановимся на ряде аспектов моделирования зон тепловыделяющего слоя.

Сформировавшийся слой пропитан натрием. В процессе выделения остаточного тепла в топливе слой будет разогреваться, а температура пропитывающего его натрия повышаться. В слое может возникнуть естественная конвекция, которая интенсифицирует процесс теплопередачи. 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.

Для учета естественной конвекции теплоносителя в слое вводится эффективный коэффициент теплопроводности. В случае возникновения естественной конвекции жидкого теплоносителя, т. е. при числе Нуссельта больше 1, коэффициент теплопроводности слоя умножается на число Нуссельта, которое зависит от числа Рэлея для пористой среды с энерговыделением.

Для описания процесса теплопередачи при кипении теплоносителя используется коэффициент эффективной теплопроводности λ_{ef} , отражающий данный процесс.

Теплопередача в осушенной зоне осуществляется вследствие теплопроводности слоя, в котором жидкий теплоноситель заменен паром, а также теплового излучения. Теплопроводность слоя как многокомпонентной системы со сферическими твердыми частицами, находящимися в жидкости или паре, рассчитывается по формуле Кампфа и Карстена [4]. Так как теплопроводность пара мала, то истинная теплопроводность слоя, определенная по указанной формуле, также мала. В расчетах используется эффективная теплопроводность с добавкой, вызванной излучением.

В зонах плавления топлива (стали) и кипения стали рассчитывается эффективная теплопроводность λ_{ef} .

Помимо понятия эффективной теплопроводности, используется понятие эффективной теплоемкости для всех состояний, присущих системе. Эффективная теплоемкость выражается по формуле Н. И. Никитенко [5]:

$$c_{ef} = \begin{cases} c & \text{при } T \notin [T_S, T_L]; \\ c + \frac{2}{3} \frac{L + c_p(T_L - T_S)}{(T_L - T)^{1/3} (T_L - T_S)^{2/3}} & \text{при } T \in [T_S, T_L]. \end{cases}$$

Плавление частиц стали, а затем топлива учитывается путем введения стоков тепла в тепловыделяющем слое. Будем следовать работе [6]. Текущий размер (изменение во времени) "крупинки" определяется в результате решения задачи Стефана для шара методом Лейбензона. Для затвердевания шара она решена С. С. Ковнером. При плавлении, например, стали время расплавления (крупинки) находится как

$$\tau = \frac{L\rho_{st}(\eta - r_0)^2(2\eta + r_0)}{6\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})r_0}.$$

Отсюда можно найти $\eta(\tau)$, воспользовавшись методом Вегстейна [7]. Текущая объемная доля стали равна

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 \left(\frac{\eta}{r_0}\right)^3,$$

где $\varepsilon_0 = \varepsilon_c(0)$.

Задав ε_0 и $d = 2r_0$, можно получить источники концентрации жидкой стали в смеси при плавлении твердых включений стали:

$$q_{c,st} = \frac{3Nu\lambda_{mix}(t_{mix} - t_{m,st})}{2L\eta^2} \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}$$

и соответственно найти стоки тепла $q_{V,st} = -L_{st}q_{c,st}$. Аналогично определяются стоки тепла при плавлении твердых частиц топлива.

Учет процессов кипения и конденсации

Пузыри стали конденсируются непосредственно у поверхности раздела *тепловыделяющий слой — натрий*. Тепло, которое высвобождается при конденсации пузырей стали, расходуется 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 затрачивается 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 расходуется 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.

Определение замыкающих коэффициентов

Получим стоки тепла в зоне с теплообменниками.

Распределение температуры теплоносителя по длине трубки теплообменника в одномерном приближении описывается уравнением

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + B (T^I - T). \quad (10)$$

В (10) использованы следующие обозначения: T^I — температура теплоносителя первого контура, определяемая в результате совместного решения уравнений *пористого тела* и уравнения (10); w — фильтрационная скорость натрия в пористой среде; $B = 2k/R$; k — коэффициент теплопередачи, причем $1/k = 1/\alpha_1 + \delta_i/\lambda_{st} + 1/\alpha_2$; R — радиус трубки, с краевыми условиями

$$T(z, 0) = T^0, \quad \text{если } 0 \leq z \leq l;$$

$$T(0, \tau) = T_0, \quad \text{если } \tau > 0.$$

Если $G_2(\tau)$ — расход теплоносителя по второму контуру, то скорость w в уравнении (10) выражается как

$$w = \frac{6G_2}{\rho S}.$$

Стоки тепла находятся для каждой ячейки. Расход теплоносителя по второму контуру через ячейку (i, k) $G_{2,c} = S_c \rho_c w$. Учитывая, что $S_c = 2\pi r \Delta r$, $V_c = 2\pi r \Delta r \Delta z$, находим

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

Эмпирические функции и коэффициенты ξ_z , ξ_r и v_{ef} , замыкающие систему уравнений гидродинамики пористого тела, были получены из многочисленных и разнообразных опытных данных разных авторов [8].

Для определения $\lambda_{ef,z}$ и $\lambda_{ef,r}$ используются выражения

$$\lambda_{ef,z} = \sum_i \lambda_i \varepsilon_i \left(\sum_i \varepsilon_i = 1 \right); \quad \lambda_{ef,r} = 1 / \sum_i \frac{\varepsilon_i}{\lambda_i}.$$

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 [9].

Предложенная расчетная модель реализована в виде программы БРУТ [10]. Программа позволяет определить возможность выхода расплава на днище корпуса и его взаимодействия с корпусом реактора.

Расчет удержания расплавленного топлива в реакторе

По программе БРУТ в работе [2] выполнены расчеты двух сценариев аварии: с расплавлением 6 и 36 ТВС. При расплавлении 6 ТВС радиус слоя $R = 13,76 \cdot 10^{-2}$ м, высота слоя $h = 0,83$ м; при расплавлении 36 ТВС $R = 31,63 \cdot 10^{-2}$ м, $h = 0,88$ м. 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.

Так как большая часть ТВС АЗ не разрушилась, то в качестве подобласти рассматривается зона ТВС, проникаемая для натрия. Соответственно несколько видоизменяется математическая модель, описанная выше. На границах разнородных зон необходимо поставить условия сопряжения. Тепловыделяющий слой может плавить ТВС, граничащие с ним. Боковое плавление моделируется так же, как плавление конструкций, находящихся под тепловыделяющим слоем, т. е. путем решения задачи Стефана. Условия Стефана реализуются на границе *слой—ТВС*.

Важное место занимает кипение стали в тепловыделяющем слое. Образующиеся при кипении пузырьки стали конденсируются вблизи поверхности раздела *слой—натрий*, и высвобождающееся тепло идет на испарение натрия. 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. Кипение в слое представляет собой длительный процесс. Он может прекратиться после существенного снижения энерговыделения, когда слой начнет остывать. Как следствие, прекратится и кипение натрия над тепловыделяющим слоем.

Для случая расплавления 6 ТВС следует отметить, что в реакторе развивается достаточно интенсивная естественная конвекция натрия. Под действием стоков тепла, возникающих в зоне с теплообменниками и насосами и имеющих большие значения при номинальном расходе натрия второго контура, происходит сравнительно быстрое охлаждение натрия и конструкций внутри корпуса реактора. Наблюдаются кипение стали в тепловыделяющем слое и кипение натрия над слоем. В верхней области перелива "языки" более горячего натрия проникают в подобласть с теплообменниками. В то же время происходит охлаждение сборок и тепловыделяющего слоя поступающим из напорной камеры натрием со сравнительно низкой температурой. Таким образом, образуется замкнутый контур естественной циркуляции, обеспечивающий охлаждение внутрикорпусных конструкций и способствующий теплоотводу от слоя.

Несмотря на интенсивное охлаждение, имеет место плавление нижнего торцевого экрана. Однако с течением времени скорость проплавления экрана уменьшается и плавление прекращается. Максимальная глубина проплавления нижнего торцевого экрана составляет 0,2 м. Плавятся также ТВС АЗ. Проплавление сборок в радиальном направлении за 2,5 часа составляет $\sim 0,05$ м.

На рис. 2 приведена зависимость температуры верхней плиты напорной камеры от времени. Поверхность плиты не нагревается, так как на пути ее нагревания есть мощный заслон — плавление нижнего торцевого экрана. Плита охлаждается снизу холодным натрием.

В случае расплавления 36 ТВС наблюдается плавление нижнего торцевого экрана, затем плавление прекращается. В связи с уменьшением расхода натрия второго контура (30 % от номинального) охлаждение тепловыделяющего слоя ухудшается. В результате максимальная глубина проплавления нижнего торцевого экрана возрастает до 0,3 м. Проплавление сборок в радиальном направлении за 2,5 часа достигает $\sim 0,07$ м.

На рис. 3 показана зависимость расхода натрия через реактор от времени.

В целом по результатам расчетов по программе БРУТ можно сделать вывод о том, что разрушения напорного коллектора, выхода кориума на днище корпуса и его взаимодействия с корпусом реактора

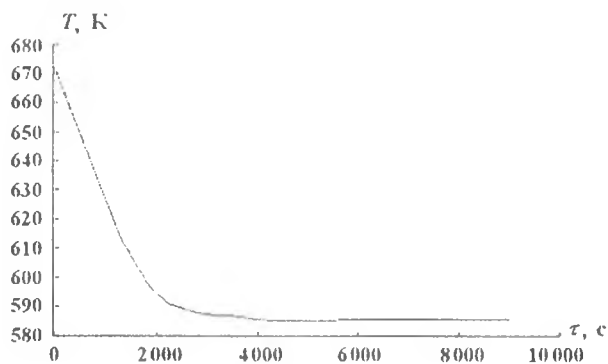


Рис. 2. Изменение температуры на поверхности верхней плиты напорной камеры в точке с координатами $r = 0,0688$ м, $z = 1,445$ м

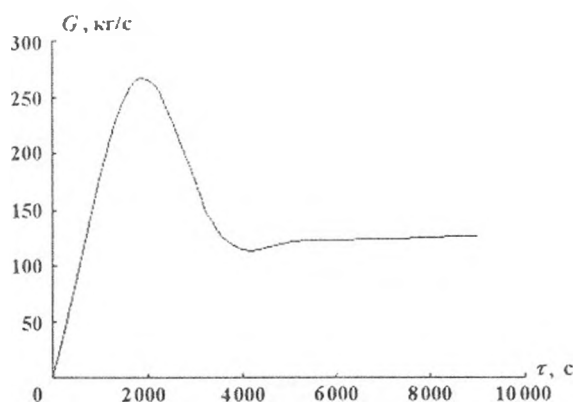


Рис. 3. Изменение расхода натрия через реактор во времени в случае расплавления 36 ТВС

не происходит. Следовательно, можно утверждать, что в обоих вариантах, при разрушении 6 и 36 ТВС, расплавленное топливо удерживается в реакторе.

Расчет процесса удержания расплавленного топлива в корпусе реактора выполнен также при полном плавлении АЗ. Расчет начинается с того состояния, в котором на нижнем торцевом экране расположена треть массы топлива и стали АЗ и верхний торцевой экран. Толщина слоя составляет 0,38 м, его начальная температура 1473 К.

В последующем процессе треть массы топлива и стали АЗ оседает в виде частиц в сборках стальной защиты, остальная масса оседает вниз, наращивая слой на нижнем торцевом экране. Задача осаждения частиц решена в рамках математической модели, на основе которой разработана программа БРУТ. Время осаждения частиц составило ~ 1 мин.

После осаждения частиц образуется полный тепловыделяющий слой, в верхней части которого присутствует натрий. Объемная доля натрия в пересчете на весь слой составляет 0,129. Полная высота слоя — 0,648 м, объем — $2,29 \text{ м}^3$. В дальнейшем слой разогревается, натрий внутри слоя выкипает, происходит плавление стали и затем топлива в слое. Толщина плотного слоя без натрия равна 0,568 м, доли стали и топлива — 0,326 и 0,674 соответственно.

Отметим, что расход натрия во втором контуре в первые 30 мин процесса определяется естественной циркуляцией теплоносителя во втором контуре и в данном режиме задан равным 10 % от номинального значения. Далее расход увеличивается до 30 % от номинального.

В соответствии с результатами расчетов происходит полное плавление нижнего торцевого экрана. Время расплавления экрана равно 14500 с. Поля температуры для моментов времени 3600, 7200, 10800 и 54100 с приведены на рис. 4. На рис. 5 отдельно представлено поле температуры в тепловыделяющем слое в момент времени $\tau = 900$ с.

Из рис. 4 видно, что с течением времени происходит продвижение *холодного* фронта в направлении тепловыделяющего слоя. В верхней области перелива наблюдается встречное течение натрия с передачей тепла во второй контур в верхней части теплообменников. Картина течения достаточно сложна: имеет место сложное вихреобразное течение натрия, причем вихри перемещаются по пространству расчетной области.

В дальнейшем рассчитывается взаимодействие расплава с коллекторами-модулями с учетом стали газовой полости. В соответствии с результатами расчетов происходит медленное плавление коллекторов-модулей, которое практически прекращается к моменту времени ~ 137000 с. Соответствующая максимальная глубина проплавления коллекторов-модулей составила 0,48 м.

С течением времени охлаждение, обусловленное действием стоков тепла в теплообменниках, начинает проявляться все в большей степени. Представляет интерес характер изменения температуры верхней плиты напорной камеры. Соответствующая зависимость приведена на рис. 6.

Важное значение имеет вопрос об эффективности теплоотвода от разрушенного топлива при аварии. На рис. 7 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.

На основании проведенного расчетного анализа можно утверждать, что при заданных параметрах не происходит разрушения верхней плиты напорной камеры. Фронт плавления стабилизируется, и тепловыделяющий слой начинает остывать. Таким образом, обеспечивается удержание разрушенной АЗ в корпусе реактора без его проплавления.

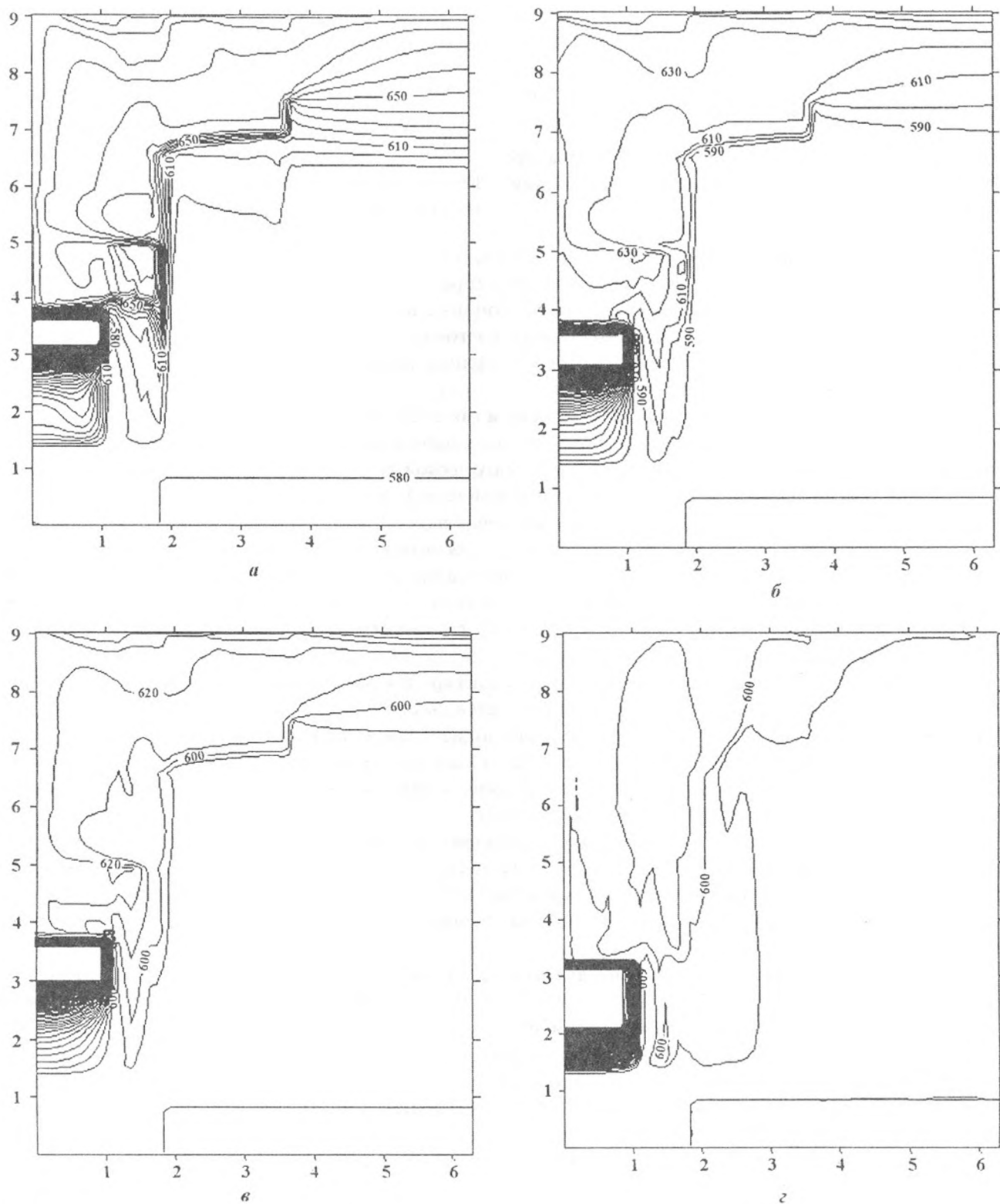


Рис. 4. Поле температуры: а — $\tau = 3600$ с; б — $\tau = 7200$ с; в — $\tau = 10800$ с; з — $\tau = 54100$ с

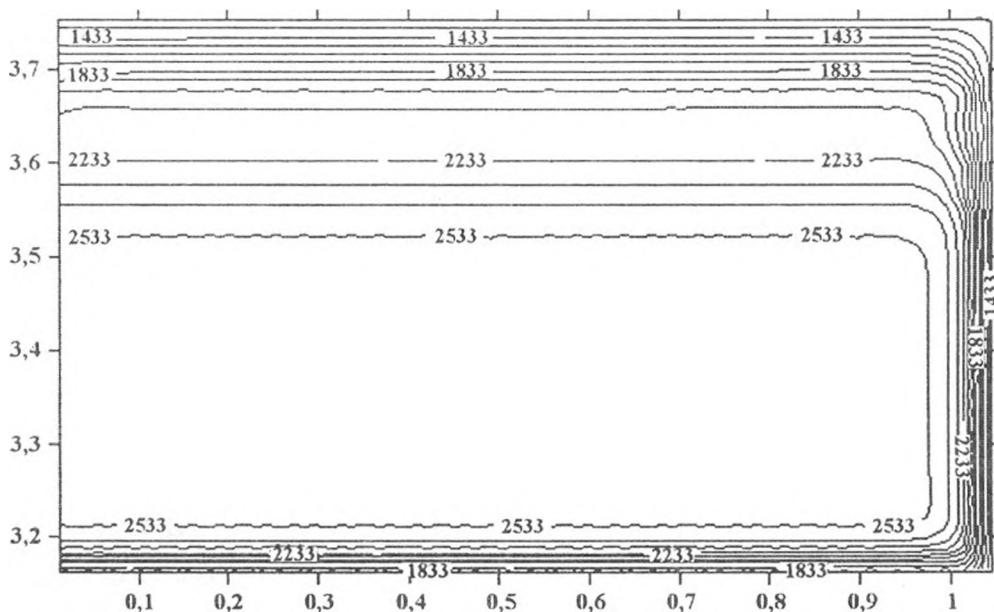


Рис. 5. Поле температуры в тепловыделяющем слое в момент времени $\tau = 900$ с

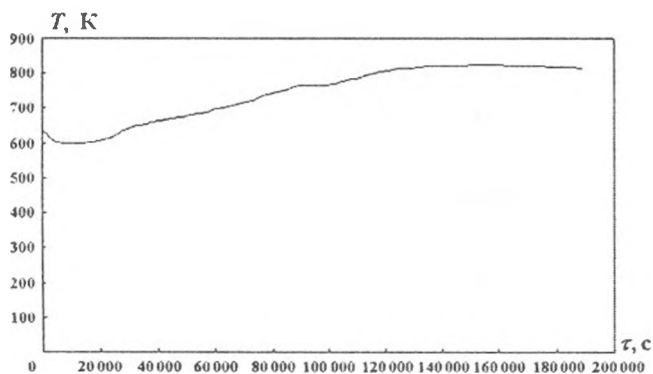


Рис. 6. Температура верхней поверхности плиты в зависимости от времени ($r = 0,068$ м, $z = 1,45$ м)

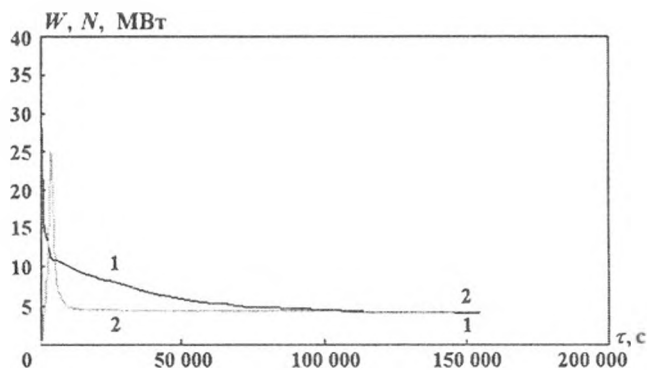


Рис. 7. Изменение энерговыделения и отводимой во второй контур мощности во времени: 1 — энерговыделение; 2 — мощность теплоотвода

Заключение

В результате выполненной работы:

1. Предложена математическая модель процессов удержания расплава в корпусе быстрого реактора при тяжелой аварии. Уравнения сохранения массы, импульса и энергии решены в многосвязной области, состоящей из 15 подобластей.
2. Решена задача формирования тепловыделяющего слоя на нижнем торцевом экране. Выполнено моделирование зон тепловыделяющего слоя. В частности, плавление частиц стали, а затем топлива учтено путем введения стоков тепла в тепловыделяющем слое.
3. Осуществлен учет процессов кипения натрия и стали в тепловыделяющем слое, натрия вне слоя и конденсации паров натрия.
4. Получено соотношение для определения стоков тепла в зоне с теплообменниками.
5. Разработанная расчетная модель реализована в виде программы БРУТ. Программа позволяет определить возможность выхода расплава на днище корпуса и его взаимодействия с корпусом реактора и может быть использована для расчета любого сценария аварии.

6. По программе БРУТ выполнены расчеты двух сценариев аварии: с расплавлением 6 и 36 ТВС. В целом по результатам расчетов по программе БРУТ можно сделать вывод о том, что разрушения напорного коллектора, выхода расплава на днище корпуса и его взаимодействия с корпусом реактора не происходит. Следовательно, можно утверждать, что в обоих вариантах, при разрушении 6 и 36 ТВС, расплавленное топливо удерживается в реакторе.

7. Выполнен расчет процесса удержания расплавленного топлива в корпусе реактора для энергетического сценария развития запроектной аварии, в котором предполагается полное плавление АЗ. На основании проведенного расчетного анализа можно утверждать, что при заданных параметрах не происходит разрушения верхней плиты напорной камеры. Фронт плавления стабилизируется. Таким образом, обеспечивается удержание разрушенной АЗ в корпусе реактора без его проплавления.

Список литературы

1. *Субботин В. И. и др.* Решение задач реакторной теплофизики на ЭВМ. М.: Атомиздат, 1979.
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. *Низматулин Р. И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1.
4. *Kampf H., Karsten G.* Effects of different types of void volumes on the radial temperature distribution of fuel pins // Nuclear Applications and Technology. 1970. Vol. 9, No 3. P. 288—300.
5. *Никитенко Н. И.* Теория теплопереноса. Киев: Наукова думка, 1983.
6. *Кащеев М. В.* Моделирование стратификации компонента кориума при тяжелой аварии // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2002. № 3. С. 3—13.
7. *Wegstein J. H.* Accelerating convergence of iterative processes // Comm. Assoc. Comput. Mach. 1958. Vol. 1, No 6, 9.
8. *Митенков Ф. М., Юрьев Ю. С. и др.* Проектирование теплообменных аппаратов АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1988.
9. *Артемьев В. К.* Вариант неявного метода для решения системы уравнений Навье—Стокса в естественных переменных: Препринт № 1962. Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1989.
10. *Кащеев М. В., Кузнецов И. А.* Расчетное исследование процессов удержания тепловыделяющего слоя в быстром реакторе при тяжелой аварии // Тр. V-го Минского межд. форума по теплообмену. Минск, 2004. С. 8—20.

Статья поступила в редакцию 25.02.05.
