

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО ТОПЛИВА В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

М.В. Кащеев, Ю.М. Ашурко

ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Разработана достаточно полная математическая модель для расчетного анализа тяжелых запроектных аварий в быстрых реакторах с натриевым охлаждением. В отличие от существующих моделей разработанная модель позволяет ответить на вопрос о возможности удержания расплавленного топлива в корпусе реактора. Рассматриваемая расчетная область является многосвязной. 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. Решена задача формирования тепловыделяющего слоя на нижнем торцевом экране. Проведено моделирование зон тепловыделяющего слоя. В частности, плавление частиц стали, а затем топлива учтено путем моделирования стоков тепла в тепловыделяющем слое. Получена формула для стоков тепла в зоне с теплообменниками.

Разработанная расчетная модель реализована в виде кода БРУТ. Выполненная верификация его отдельных блоков показала удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными и результатами расчетов с использованием аналитических решений. По программе БРУТ выполнен расчет рассматриваемой аварии в реакторе типа БН большой мощности, при которой происходят полное расплавление ТВС в центре активной зоны и частичное расплавление ТВС на ее периферии. Расплавление сборок приводит к образованию двух тепловыделяющих слоев, находящихся на нижней торцевой зоне воспроизводства. Образовавшиеся тепловыделяющие слои разогреваются. Сначала плавится нижняя торцевая зона воспроизводства, а затем происходит медленное плавление коллекторов. После проплавления коллекторов и верхней плиты напорной камеры центральный тепловыделяющий слой перемещается на нижнюю плиту напорной камеры. Фронт плавления останавливается, и тепловыделяющий слой начинает остывать.

Таким образом, в соответствии с результатами расчетного анализа по программе БРУТ при рассмотренной в данной работе аварии расплавленное топливо удерживается в корпусе реактора, не разрушая его.

Ключевые слова: быстрый реактор, математическая модель, корпус реактора, тепловыделяющий слой, расплавленное топливо, стоки тепла, тяжелая авария, расчетная область.

ВВЕДЕНИЕ

При возникновении тяжелых запроектных аварий в быстрых реакторах с натриевым охлаждением возможно расплавление активной зоны (АЗ). Если АЗ реактора полностью или частично расплавлена, дальнейшее развитие аварии может закончиться либо сохранением корпуса реактора или страховочного корпуса, либо проплавлением стенок. Таким образом, возникает проблема удержания расплава в корпусе реактора, т.е. сохранения целостности корпуса реактора. В предлагаемой работе исследуется возможность отвода остаточного энерговыделения в осколках разрушенных твэлов и удержания расплава в корпусе реактора.

Расплавление сборок приводит к образованию тепловыделяющего слоя, расположенного на нижней торцевой зоне воспроизводства. Сформировавшийся тепловыделяющий слой взаимодействует с нижней торцевой зоной воспроизводства и при ее расплавлении – с нижележащими конструкциями.

Для удержания фрагментов разрушенной АЗ и их охлаждения в реакторах типа БН разработано специальное устройство (поддон), выполненное в виде чаши, охватывающей всю напорную камеру реактора. Внутренняя поверхность чаши облицована листами из молибденового сплава.

Математическая модель [1] позволяет ответить на вопрос о возможности удержания расплавленного топлива в корпусе быстрого реактора при тяжелой аварии.

Разработанная математическая модель реализована в программе БРУТ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДЕРЖАНИЯ РАСПЛАВА В КОРПУСЕ БЫСТРОГО РЕАКТОРА В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

Расчетная область является многосвязной. Моделируются тепловыделяющий слой; слой натрия над тепловыделяющим слоем; нижняя торцевая зона воспроизводства; газовая полость; коллекторы; напорная камера; внутрикорпусная защита; теплообменники; слой, содержащий корпус реактора и страховочный корпус; опорный пояс; проводящий слой неразрушившихся ТВС боковой зоны воспроизводства, сборок стальной и борной защиты; устройство для сбора топлива, 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 двухмерной цилиндрической системе координат, которые решаются с соответствующими краевыми условиями.

Исходная система уравнений сохранения массы, импульса и энергии представлена ниже [2].

Уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \rho v_r \varepsilon r + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \varepsilon = 0,$$

где ρ – плотность; ε – пористость; τ – время; v_z, v_r – продольная и поперечная компоненты скорости; z – продольная координата; r – поперечная координата.

Уравнения движения теплоносителя в пористом теле запишем как

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} - A_z \rho |v| v_z + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{eff} r \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(2 \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \mathbf{v} \right) \right],$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial \tau} + b v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + b v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} - A_r^0 \rho |v| v_r + \\ + \frac{\partial}{\partial r} 2\mu_{eff} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{1}{r} 2\mu_{eff} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \mu_{eff} \operatorname{div} \mathbf{v} ,$$

где g – ускорение свободного падения; p – давление; A_z^0, A_r^0 – компоненты тензора объемного сопротивления; b – коэффициент анизотропии инерционных сил; $|v|$ – модуль скорости; μ_{eff} – эффективный коэффициент динамической вязкости.

Уравнение энергии для теплоносителя в пористом теле

$$\overline{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \varepsilon \rho c_p \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{eff,r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{eff,z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v + Q ,$$

где c_p – изобарная теплоемкость; T – температура; $\lambda_{eff,z}, \lambda_{eff,r}$ – эффективные коэффициенты теплопроводности в продольном и поперечном направлениях соответственно; Q_v – мощность источников тепла; Q – источники (стоки) тепла при изменении агрегатного состояния компонентов и стоки тепла в зоне с теплообменниками.

Уравнение нестационарной теплопроводности для твердых тел

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

Граничные условия традиционны для этой системы уравнений.

Нормальный компонент скорости на верхней поверхности теплоносителя равен нулю.

Для касательного компонента скорости на верхней поверхности теплоносителя имеем условие скольжения.

На оси симметрии для скорости v_z выполняется условие симметрии, а скорость v_r равна нулю.

На твердых стенках, а также на поверхности фронта плавления накладывается условие прилипания.

Теплоотдача от верхней поверхности теплоносителя осуществляется излучением и естественной конвекцией газа

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha (T - T_{out}) + \varepsilon_{eff} \sigma_{SB} (T^4 - T_{out}^4) ,$$

где α – коэффициент теплоотдачи; T_{out} – температура окружающей среды; ε_{eff} – приведенная степень черноты; σ_{SB} – постоянная Стефана-Больцмана.

На внешних границах расчетной области также ставится граничное условие третьего рода с учетом излучения для эффективного коэффициента теплопередачи k_{eff} :

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial N} = k_{eff} (T - T_{out}) ,$$

где N – нормаль.

На фронте плавления задается температура плавления стали и записывается условие для определения положения фронта плавления в любой момент времени (условия Стефана)

$$T_1 = T_2 = T_{m,st} ,$$

$$\varepsilon_{st} \rho_{st} L_{m,eff} \frac{\partial \xi}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} , \quad \varepsilon_{st} \rho_{st} L_{m,eff} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} - \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} ,$$

где $T_{m,st}$ – температура плавления стали; ε_{st} – объемная доля стали; ρ_{st} – плотность стали; $L_{m,eff}$ – эффективная теплота плавления; ξ – поперечная координата точек фронта

плавления; η – продольная координата точек фронта плавления.

Индекс «1» используется для переменных, относящихся к области расплава, индекс «2» – для переменных, относящихся к плавящейся среде.

На оси симметрии выполняется условие симметрии для температуры

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕГО СЛОЯ

Формирование тепловыделяющего слоя. Для определения объемной концентрации частиц топлива и стали в теплоносителе используется выражение

$$c = M \cdot (1 - \delta - \delta_0) / (V \cdot \rho),$$

где M – суммарная масса частиц; ρ – эффективная плотность; $V = \pi R^2 (H - h_0)$ – объем, в котором в нулевой момент времени распределены с постоянной концентрацией c частицы топлива и стали; h – толщина слоя; δ – доля осевших частиц; δ_0 – доля частиц, не попавших в слой.

При движении ансамбля частиц в жидкости отдельно взятая частица испытывает гидродинамическое воздействие со стороны соседних частиц. В этом случае говорят о стесненном движении частиц. Необходимо учитывать влияние стесненности на коэффициент сопротивления C_{μ} . В монографии [3] приведено выражение для коэффициента стесненности E

$$E = (1 - c)^{4,75} \cdot (18 + 0,61 \cdot Ar^{1/2}) / (18 + 0,61 \cdot (Ar \cdot (1 - c)^{4,75})^{1/2}),$$

где $Ar = gd^3 \cdot (\rho / \rho_f - 1) / \nu_f^2$ – критерий Архимеда для частицы; ν_f – коэффициент кинематической вязкости жидкости; ρ_f – плотность жидкости; d – диаметр частицы.

Коэффициент сопротивления для стесненного движения частицы равен

$$C_{\mu, \text{con}} = C_{\mu} E^{-2}.$$

Моделирование 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, а затем топлива, в результате образуется зона плавления. С течением времени сталь в слое может закипеть, что приводит к возникновению зоны кипения стали.

Плавление частиц стали и топлива учитывается путем моделирования стоков тепла в тепловыделяющем слое. Согласно работе [4], текущий размер (изменение во времени) крупинки определяется в результате решения задачи Стефана для шара методом Лейбензона. Для затвердевания шара она решена в [5]. При плавлении стали время расплавления крупинки находится по формуле

$$\tau = L_{st} \rho_{st} (\eta - r_0)^2 \cdot (2\eta + r_0) / (6 \lambda_{mix} (T_{mix} - T_{m, st}) r_0),$$

где L_{st} – теплота плавления стали; η – координата точек фронта плавления крупинки;

r_0 – начальный радиус крупинки; λ_{mix} – коэффициент теплопроводности смеси; T_{mix} – температура смеси.

УЧЕТ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ И КОНДЕНСАЦИИ

Кипение натрия учитывается следующим образом: предполагается, что тепло, которое расходовалось на нагрев натрия, после достижения температуры кипения натрия идет на кипение натрия. Если в расчетном узле (i, k) сетки температура $T_{i,k}$ на некотором шаге по времени превысит значение, равное температуре кипения натрия $T_{B,sod}$, то в узле (i, k) устанавливается температура кипения натрия, а также начинают действовать стоки тепла

$$q_{B,sod} = \rho_{i,k} c_{p,i,k} (T_{i,k} - T_{B,sod}) / \Delta \tau,$$

где $\Delta \tau$ – шаг по времени.

Таким образом, выполняется учет кипения натрия в тепловыделяющем слое, а также вне слоя. Отметим, что, рассчитав количество теплоты, которое идет на кипение жидкости на данном шаге по времени, можно найти массу испарившейся на шаге по времени жидкости.

Образовавшиеся пузыри пара натрия всплывают вверх и конденсируются в более холодном натрии. Время до конденсации пузыря пара натрия может быть оценено в соответствии с [5] как

$$\tau = r_v \rho_v R_0^2 / (6 \lambda_f (T_{B,sod} - T_{sod})),$$

где r_v – теплота парообразования натрия; R_0 – начальный радиус пузыря пара натрия; λ_f и T_{sod} – коэффициент теплопроводности и температура натрия соответственно.

Источники тепла при конденсации паров натрия составляют

$$q_v = q_F F / V,$$

где q_F – средняя плотность теплового потока с поверхности тепловыделяющего слоя в натрий; F – площадь верхней поверхности тепловыделяющего слоя; V – объем, в котором происходит конденсация паров.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАМЫКАЮЩИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ И ФУНКЦИЙ

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

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \chi w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + B(T^I - T), \quad (1)$$

где T^I – температура теплоносителя первого контура, определяемая в результате совместного решения уравнений пористого тела с уравнением (1); w – фильтрационная скорость натрия в пористой среде; χ – отношение площади кольца теплообменников к суммарной площади проходных сечений трубок теплообменников; $B = 2K/R$, (K – коэффициент теплопередачи, причем $1/K = 1/\alpha_1 + \delta_t/\lambda_{st} + 1/\alpha_2$); R – радиус трубки; δ_t – толщина стенки трубки. Краевые условия имеют вид

$$T(z, 0) = T^0 \quad \text{при } 0 \leq z \leq \lambda,$$

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

$$\partial T(\lambda, \tau) / \partial z + \alpha_{eff} (T(\lambda, \tau) - T_{out}) / \lambda = 0 \quad \text{при } \tau > 0,$$

где λ – длина трубки.

Если $G_2(\tau)$ – расход теплоносителя по второму контуру, то скорость w в уравнении (1) выражается как

$$w = nG_2 / (\rho S),$$

где n – количество теплообменников; S – площадь кольца теплообменников.

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

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

где ΔT_c – подогрев теплоносителя на длине ячейки Δz_c .

Эмпирические функции и коэффициенты ξ_z, ξ_r, v_{eff} , замыкающие систему уравнений гидродинамики пористого тела, определяются по рекомендациям работы [6]. В данном случае ξ_z, ξ_r – эффективные коэффициенты гидравлического сопротивления при продольном и поперечном обтекании соответственно; v_{eff} – эффективная вязкость жидкости.

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

$$\lambda_{eff,z} = \sum \lambda_i \varepsilon_i \quad (\sum \varepsilon_i = 1),$$

$$\lambda_{eff,r} = 1 / \sum (\varepsilon_i / \lambda_i).$$

Для решения задачи применяется неявный метод решения уравнений Навье-Стокса в естественных переменных (метод В.К. Артемьева и Н.И. Булеева), разработанный в ГНЦ РФ-ФЗИ [7].

Программа БРУТ и ее верификация

Проведено сравнение результатов расчета по программе БРУТ с экспериментальными данными. Использованы результаты экспериментов серии D, выполненных в лаборатории Sandia в реакторных условиях [8].

Получено достаточно хорошее согласие с экспериментальными данными при значениях недогрева натрия до температуры насыщения, характерных для условий при запроектной аварии с расплавлением АЗ в быстром реакторе.

Выполнена верификация блока расчета естественной конвекции кода БРУТ [9] на основе эксперимента СОРО [10]. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчета с экспериментальными данными СОРО.

Проверка расчета теплообмена по программе БРУТ проводилась с использованием экспериментальных данных ГНЦ РФ-ФЗИ по температуре на внутренней и наружной поверхностях стальной стенки [9]. Рассматривался процесс нестационарного теплообмена при охлаждении модели днища корпуса реактора недогретой водой. Соответствующая серия экспериментов выполнена на стенде ИК (имитация кориума). Сравнение результатов расчета по программе БРУТ с экспериментальными данными ГНЦ РФ-ФЗИ подтверждает корректность математической модели и кода БРУТ при расчете теплообмена.

Осуществлена проверка работоспособности блока расчета проплавления внутриреакторных конструкций [9]. В качестве тестовой задачи рассматривалась задача промерзания влажного грунта. Наблюдается хорошее совпадение результатов расчета глубины промерзания грунта по программе БРУТ с теоретическим решением Стефана.

Для проверки правильности расчета температурного поля в тепловыделяющем слое использовалось точное аналитическое решение задачи нестационарной теплопроводности ограниченного цилиндра радиуса R и длиной l с непрерывно действующими источниками тепла, помещенного в среду с переменной во времени температурой, с граничными условиями третьего рода на трех границах, полученное разработчиком кода методом конечных интегральных преобразований в работах [11,12]. Сравнение резуль-

татов расчета по программе БРУТ с результатами расчета с использованием аналитического решения показало, что они практически совпадают.

Описание результатов расчета возможности удержания расплавленного топлива в реакторе типа БН большой мощности с помощью программы БРУТ

По программе БРУТ выполнен расчет аварии, при которой происходит полное расплавление ТВС в центре АЗ и частичное расплавление ТВС на ее периферии. Расплавление сборок приводит к образованию двух тепловыделяющих слоев, находящихся на нижней торцевой зоне воспроизводства. Начальное состояние центрального слоя характеризуется температурой, принятой равной 1073 К. Начальная температура слоя на периферии равна 1273 К.

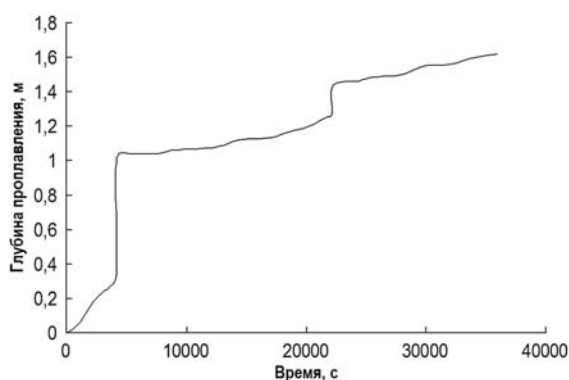


Рис. 1. Зависимость глубины проплавления конструкций от времени

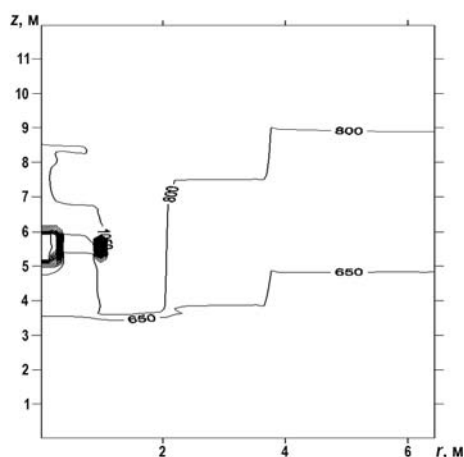


Рис. 2. Поле температуры в момент времени $t = 3600$ с

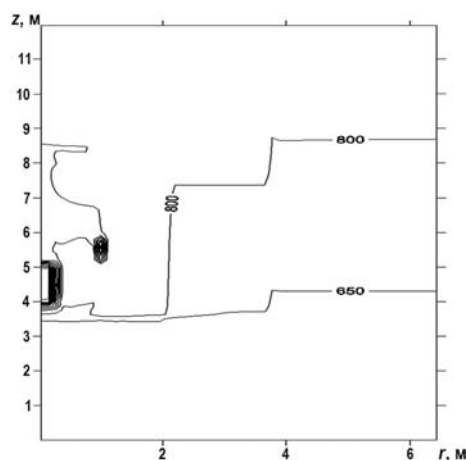


Рис. 3. Поле температуры в момент времени $t = 32400$ с

Так как часть ТВС не разрушилась, то в качестве подобластей рассматриваются зоны, проницаемые для натрия. На границах разнородных зон необходимо поставить условия сопряжения. Плавление конструкций, находящихся под тепловыделяющими слоями, рассчитывается путем решения задачи Стефана.

Образовавшиеся тепловыделяющие слои разогреваются. Сначала плавится нижняя торцевая зона воспроизводства, а затем происходит медленное плавление коллекторов, которое завершается к моменту времени ~ 36000 с (10 часов). Время проплавления НТЗВ равно 4200 с ($\sim 1,2$ часа). Взаимодействие расплава с коллекторами рассчитывается с учетом стали газовой полости.

На рисунке 1 показана зависимость глубины проплавления конструкций от време-

ни. Поля температуры для моментов времени 3600 с (1 час), 32400 с (9 часов) представлены на рис. 2,3. Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что происходит заметное продвижение центрального тепловыделяющего слоя.

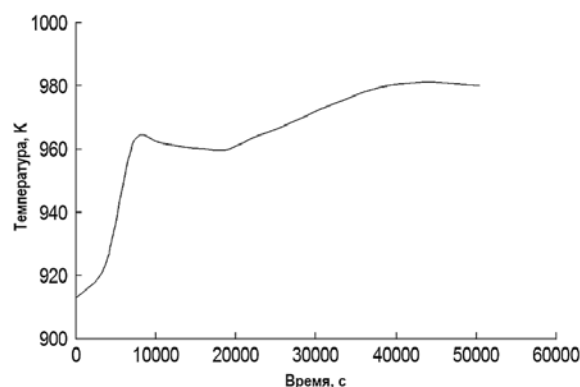


Рис. 4. Зависимость температуры основного корпуса при $z = 10,48$ м от времени

Зависимость температуры основного корпуса на уровне входа в ПТО от времени приведена на рис. 4.

После проплавления коллекторов начинает плавиться верхняя плита напорной камеры. Время ее проплавления составляет 4800 с (~ 1,3 часа). Затем центральный тепловыделяющий слой перемещается на нижнюю плиту напорной камеры. Фронт плавления останавливается и тепловыделяющий слой начинает остывать. Таким образом, обеспечивается удержание частично разрушенной АЗ в корпусе реактора без его проплавления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые разработана достаточно полная математическая модель для расчетного анализа тяжелых аварий в быстрых реакторах с натриевым охлаждением. Данная модель позволяет ответить на вопрос о возможности удержания расплавленного топлива в корпусе реактора.

Решена задача формирования тепловыделяющего слоя на нижнем торцевом экране. Выполнено моделирование зон тепловыделяющего слоя, в частности, плавление частиц стали, а затем топлива учтено путем моделирования стоков тепла в тепловыделяющем слое.

Разработанная математическая модель реализована в программе БРУТ. В соответствии с результатами расчетного анализа по программе БРУТ при рассмотренной в данной работе аварии расплавленное топливо удерживается в корпусе реактора, не разрушая его.

Литература

1. Кащеев М.В., Кузнецов И.А. Математическое моделирование удержания расплавленного топлива в корпусе быстрого реактора при тяжелой аварии. Математическая модель. // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, – № 4. – С. 627-632.
2. Субботин В.И., Кащеев В.М., Номофилов Е.В., Юрьев Ю.С. Решение задач реакторной физики на ЭВМ. – М.: Атомиздат. 1979. – 144 с.
3. Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.
4. Кащеев М.В. Моделирование стратификации компонент кориума при тяжелой аварии. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 3. – С. 3-13.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. Проектирование теплообменных аппаратов АЭС. / Под ред. Ф.М. Митенкова. – М.: Энерго-

атомиздат, 1988. – 296 с.

7. *Артемьев В.К.* Вариант неявного метода для решения системы уравнений Навье-Стокса в естественных переменных. Препринт № 1962. Обнинск: ФЭИ, 1989. 22 с.

8. *Lipinski R.J., Gronager J.E., Schwarz M.* Particle bed heat removal with subcooled sodium: D-4 results and analysis // Nuclear Technology. – 1982. – V. 58. – № 3. – PP. 369-378.

9. *Кашеев М.В., Кузнецов И.А.* Математическое моделирование удержания расплавленного топлива в корпусе быстрого реактора при тяжелой аварии. Результаты расчета по программе БРУТ. // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47., – № 5. – С. 765-770.

10. *Kymäläinen O. e. a.* Heat Flux Distribution from a Volumetrically Heated Pool with High Rayleigh Number // Proceedings of 6th International Topical Meeting on Reactor Thermal-Hydraulics. – Grenoble, France: – 5-8 Oct. 1993. – Vol. 1. – PP. 47-53.

11. *Кашеев М.В.* Решение задачи теплопроводности для кольцевого цилиндра конечных размеров с внутренними источниками тепла. // Теплоэнергетика. – 2011. – № 2. – С. 71-73.

12. *Кашеев М.В.* Пять тестовых задач: Препринт № 3150. Обнинск: ФЭИ, 2009, – 25с.

Поступила в редакцию 07.11.2013

Авторы

Кашеев Михаил Васильевич, старший научный сотрудник, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: ktmv@ippe.ru

Ашурко Юрий Михайлович, начальник лаборатории, ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ», кандидат техн. наук.

E-mail: ashurko@ippe.ru

УДК 621.039.586

RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF MELTED FUEL CONTAINMENT IN A FAST REACTOR AT A SEVERE ACCIDENT

Kascheev M.V., Ashurko Yu.M.

State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering named after A.I. Leypunsky, Obninsk, Kaluga reg., Russia

ABSTRACT

A rather complete mathematical model for calculation analysis of severe beyond-design accidents in sodium cooled fast reactors has been developed for the first time. Unlike the current models, the model developed enables one to answer the question of the possibility of containing melted fuel in the reactor vessel. The computational domain under consideration is multiply connected. The mathematical simulation of sub-domains as porous bodies was performed using mass, momentum, and energy conservation laws, written in the form of continuity, motion, and energy equations in two-dimensional cylindrical coordinates. The problem of heat-generating layer formation on the bottom end-shield was solved. The zones of heat-generating layer were simulated. In particular, the melting of steel particles, and then those of fuel, was included by simulating the heat sinks in the heat-generating layer. The formula for heat sinks in the heat exchangers zone was derived.

The developed analytical model is implemented in the form of the BRUT computer code. Verification of individual blocks of the code showed satisfactory agreement of the calculation results with the available experimental data as well as with the results of analytical solution. A calculation analysis of a severe accident in a high power fast reactor was performed with the use of the BRUT code. The analysis considers a complete melting of fuel assemblies in the center of the reactor core and a partial melting of peripheral assemblies. Melting of assemblies results in formation of two heat-generating layers, located on the bottom end-shield of the blanket region. As the heat-generating layers heat up the bottom end-shield of the blanket region melts first with subsequent slow melting of the headers. After the headers and the pressure chamber upper plate melt-through the central heat-generating layer proceeds to the lower plate of the pressure chamber. The melt front comes to rest and heat-generating layer starts to cool off.

Using the BRUT code it was shown that in a severe accident, considered in the paper, melted fuel was contained in the reactor vessel without its destruction.

Key words: fast reactor, mathematical model, vessel of reactor, heat-releasing layer, molten fuel, heat sinks, severe accident, computational domain.

REFERENCES

1. Kascheev M.V., Kuznecov I.A. Matematicheskoe modelirovanie uderzhaniya rasplavlennogo topliva v korpuse bystrogo reaktora pri tyazhelej avarii. Matematicheskaya model' [Mathematical modeling retention of molten fuel in the housing of fast reactor during severe accident. Mathematical model]. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2009, vol. 47, no. 4, pp. 627–632.
2. Subbotin V.I., Kascheev V.M., Nomofilov E.V., Yu'ev Yu.S. *Reshenie zadach reaktornoj fiziki na EVM* [Solving problems of reactor physics on a computer]. Moscow, Atomizdat Publ. 1979, 144 p.
3. Gorbis Z.R. Teploobmen i gidromekhanika dispersnyh skvoznyh potokov. [Heat transfer and hydromechanics of dispersed throughflows]. Moscow, Energiya Publ. 1970, 424 p.
4. Kascheev M.V. Modelirovanie stratifikatsii komponent koriuma pri tyazhelej avarii [Modeling of stratification of corium components in severe accident]. *Izvestiya vuzov*.

Yadernaya energetika. 2002, no. 3, pp. 3–13.

5. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 1967, 600 p.

6. Mitenkov F.M. eds. *Proektirovanie teploobmennyykh apparatov AES* [Designing of heat-exchange apparatus for NPP]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1988, 296 p.

7. Artem'ev V.K. Variant neyavnogo metoda dlya resheniya sistemy uravnenij Nav'e-Stoksa v estestvennykh peremennykh. [Version of implicit method for solving the Navier-Stokes equations in natural variables.] Preprint no. 1962. Obninsk: SSC RF-IPPE, 1989. 22 p. (in Russian)

8. Lipinski R.J., Gronager J.E., Schwarz M. Particle bed heat removal with subcooled sodium: D-4 results and analysis. *Nuclear Technology*. 1982, vol. 58, no. 3, pp. 369–378.

9. Kascheev M.V., Kuznecov I.A. Matematicheskoe modelirovanie uderzhaniya rasplavlennogo top-liva v korpuse bystrogo reaktora pri tyazhelej avarii. Rezul'taty rascheta po programme BRUT [Mathematical modeling retention of molten fuel in the housing of fast reactor during severe accident. The results calculated using program BRUT]. *Teplofizika vysokih temperatur*. 2009, vol. 47, no. 5, pp. 765–770.

10. Kymalainen O. e. a. Heat Flux Distribution from a Volumetrically Heated Pool with High Rayleigh Number . Proceedings of 6th International Topical Meeting on Reactor Thermal-Hydraulics. Grenoble, France. 5–8 Oct. 1993, vol. 1. pp. 47–53.

11. Kascheev M.V. Reshenie zadachi teploprovodnosti dlya kol'cevogo cilindra konechnykh razmerov s vnutrennimi istochnikami tepla [Solution of the problem of heat conduction for the annular cylinder of finite dimensions with internal heat sources]. *Teploenergetika*. 2011, no. 2, pp. 71–73.

12. Kascheev M.V. Pyat' testovykh zadach. [Five test problems.] Preprint no. 3150. Obninsk: SSC RF-IPPE, 2009. 25 p. (in Russian)

Authors

Kascheev Mihail Vasil'evich, Senior Scientific Researcher, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: kmv@ippe.ru

Ashurko Yuriy Mihajlovich, Head of Laboratory, FSUE «SSC RF-IPPE»,
Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: ashurko@ippe.ru