

# РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОГО АКСИАЛЬНОГО ПРОДВИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ МАССЫ ПРИ АВАРИИ С РАСПЛАВЛЕНИЕМ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК БЫСТРОГО РЕАКТОРА\*

**Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин**

*Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород*



Разработана модель процесса длительного продвижения расплавленной тепловыделяющей массы от активной зоны к напорной камере при аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора на быстрых нейтронах. Расчетная модель предназначена для оценки глубины и времени продвижения тепловыделяющей массы. Учитывается отвод тепла в радиальном направлении от тепловыделяющей массы и нижележащих проплавленных материалов в аварийной группе ТВС к соседним неповрежденным ТВС. Для математического описания используется модель нестационарной эффективной теплопроводности.

Процесс развития аварии с мгновенной блокировкой проходного сечения отдельной ТВС при работе реактора на мощности представляет интерес с точки зрения распространения повреждений на соседние ТВС и перемещения вниз расплавленных компонентов. Анализ распространения аварии в радиальном направлении важен для разработки в проекте реактора мер по предотвращению повреждения твэлов в объеме за пределами семи ТВС. Важны также последствия такой аварии для нижележащих конструкций - будет ли расплав удержан внутри аварийных ТВС или проплавит их вплоть до хвостовиков и выйдет на плиту напорной камеры.

При номинальном тепловыделении первостепенное значение имеет аспект распространения аварии в радиальном направлении, которое прекращается при снижении мощности до остаточного уровня после остановки реактора. А значительно более медленное высотное распространение рассматривается для остановленного состояния реактора при остаточном тепловыделении в топливе, когда радиального распространения аварии уже не будет происходить.

К настоящему времени имеются данные по различным аспектам аварии с блокировкой отдельной ТВС быстрого реактора. Результаты испытаний по программе SCARABEE позволяют достаточно хорошо представлять сценарий развития такой аварии. Обсуждение итоговых результатов этой программы имеется в [1, 2, 3]. В

© Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин, 2000

*\* Данная работа выполнена при финансовой поддержке Конкурсного центра Грантов по фундаментальным исследованиям в области энергетики и электротехники при Московском энергетическом институте (Грант № 84Гр-98).*

результате прекращения расхода при полной мгновенной блокировке отдельной ТВС происходит выкипание натрия, плавление оболочек твэлов с образованием стальных блокировок каналов для теплоносителя в области нижней зоны воспроизводства. После перемещения стали плавятся таблетки топлива, образуя расплавленный и затем кипящий бассейн из топлива и стали. Взаимодействия возвращающегося натрия с расплавом вызывают выбросы расплавленных материалов и образование блокировок в верхней части активной зоны. Высокие тепловые потоки от кипящего бассейна к чехлу приводят к плавлению чехлов аварийной и соседних ТВС и проникновению расплава в межчехловые зазоры и в окружающие ТВС. При проплавлении чехла имеет место полная блокировка сталью радиального зазора между ТВС на ранней стадии процесса, которая предотвращает дальнейшее перемещение топлива в зазоре.

При своевременной остановке реактора и соответствующем снижении тепловыделения в топливе до остаточного радиальное распространение аварии прекращается. Возможность обнаружения аварии детектированием запаздывающих нейтронов подтверждается экспериментами программы SCARABEE [3]. При свежем топливе достаточно сильный сигнал может быть получен после повреждения чехла и выхода источников запаздывающих нейтронов в межчехловой зазор с потоком натрия, а также при проникновении расплава в окружающие ТВС с номинальным натриевым потоком. Проникновение расплава в окружающие ТВС с образованием полной блокировки происходит очень быстро - за 1-2 сек. Чтобы избежать распространения аварии за пределы 7 ТВС, реактор должен быть остановлен до достижения кипящего бассейна в этих сборках. При облученном топливе источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов. В этом случае радиальный размер аварии может быть ограничен пределами одной ТВС.

Блокировки каналов для теплоносителя под активной зоной препятствуют течению жидкого топлива вниз и образуют твердое основание для тепловыделяющего бассейна. Для перемещения жидкого топлива в узких каналах для теплоносителя требуется сначала расплавление материалов в области нижних блокировок. После остановки реактора это возможно в случае недостаточного теплоотвода к окружающим ТВС от вышележащей тепловыделяющей массы. Проплавление нижней блокировки отмечалось в эксперименте BE+2 [4]. В экспериментах этой серии отмечалось и некоторое движение нижнего стального бассейна вниз [1]. При проплавлении блокировки расплав будет затекать под действием силы тяжести в каналы между еще твердыми частями твэлов на некоторую длину, затвердевая там и снова образуя слой блокировок. В результате, процесс продвижения расплавленной тепловыделяющей массы вниз будет иметь, как нам представляется, не плавный, а прерывистый характер и будет состоять из ряда повторяющихся этапов: проплавление заблокированного слоя, затекание расплава на некоторую длину и затвердевание, проплавление следующего заблокированного слоя и т.д. При этом основное время будет затрачиваться на проплавление материалов конструкций под опускающейся тепловыделяющей массой. Глубина проникновения расплава в каналы составляет не более нескольких десятков см, а временной масштаб процессов течения и затвердевания - менее 1 с (см. например, [5]), что крайне мало по сравнению со временем, требующимся для расплавления очередного заблокированного слоя.

Для расчета перемещения жидкого расплавленного материала в каналах между твэлами имеется ряд кодов, например: BUCOGEL [6], CRUST [7], а также код [8], основанный на программах TRAMS-TWEL, POST и STRELM. Анализ длительного про-

движения тепловыделяющей массы из активной зоны в направлении днища корпуса за счет проплавления нижележащих конструкций проводился российскими специалистами сначала на основе соотношений теплового баланса, позднее - с помощью программы TRAMS-FDOWN [9], разработанной на основе численного решения одномерного уравнения теплопроводности с явным выделением фазовых границ [10]. В этой модели предполагается плоская граница плавления под тепловыделяющей массой, учитывается одномерное поле температуры в тепловыделяющей массе и в нижележащих материалах. В таком анализе принимается в расчет отвод тепла вниз теплопроводностью нижележащих материалов: воспроизводящего материала, стали, а также натрия. Результаты расчетов продвижения тепловыделяющей массы во всей активной зоне приводились в [11, 12].

В предыдущих расчетных оценках по программе TRAMS-FDOWN продвижение тепловыделяющей массы рассматривалось в значительном числе ТВС при прекращении номинального расхода теплоносителя в активной зоне. В таких расчетах пренебрегалось теплопередачей в радиальном направлении из-за ее незначительности по сравнению с тепловыделением расплавленной массы. При рассмотрении продвижения тепловыделяющей массы в отдельной или в нескольких ТВС следует учитывать теплоотвод к соседним неповрежденным сборкам, охлаждаемым расходом теплоносителя в них. Для учета этого дополнительного фактора потребовалась доработка модели и расчетной программы.

В настоящей работе рассматривается перемещение расплавленной тепловыделяющей массы в одной ТВС (или в небольшой группе ТВС) от активной зоны к напорной камере при аварии с блокировкой отдельной ТВС. Целью анализа является определение глубины и времени ее продвижения. Для математического описания рассматриваемого процесса используется модель нестационарной эффективной теплопроводности. В настоящей версии расчетной методики учитывается отвод тепла в радиальном направлении от тепловыделяющей массы и нижележащих проплавленных материалов к объему соседних неповрежденных ТВС. Исходное двухмерное дифференциальное уравнение с анизотропией эффективной теплопроводности в вышеуказанных направлениях решено численно. Используется приближение, в котором распределение температуры рассчитывается в аварийной группе ТВС в направлении продвижения тепловыделяющей массы (сверху вниз), при этом учитываются потери тепла в боковом направлении.

В физической модели принимается, что в начальный момент времени тепловыделяющий материал мгновенно вступает в идеальный контакт с материалами нижней зоны воспроизводства, сохраняющийся в течение всего последующего времени их плавления. Толщина жидкого тепловыделяющего слоя принимается максимальной по условию, чтобы наибольшая температура (в верхней части) была равна температуре кипения. При этом учитывается его утолщение по мере снижения остаточного тепловыделения - за счет конденсации выходящих паров топлива. В рассматриваемом тепловом балансе принимается в расчет тепловыделение только жидкого слоя без учета сложного обмена с выходящей двухфазной зоной [13]. Считается, что тепловыделяющая масса ограничивается заданными пределами - аварийной группой ТВС, а через соседние неповрежденные ТВС обеспечивается принудительная циркуляция теплоносителя. Граница раздела между тепловыделяющей массой и нижележащими материалами принимается плоской - без учета фазовых превращений при кратковременных затеканиях расплава в нижележащие межтвэльные и межпакетные промежутки. Предполагается, что по мере проплавления конструкций под активной зоной тепловыделяющая масса будет опускаться вниз через нижнюю зону воспроизводства и зону газовых полостей

твэлов до натрия в хвостовике ТВС. Скорость проплавления будет наибольшей в случае полного удаления плавящегося материала под тепловыделяющей массой так, чтобы ее нижняя поверхность постоянно соприкасалась с твердым материалом проплавления конструкций. В модели используется именно такое консервативное приближение. Расчетная методика позволяет учитывать наличие границы выпаривания натрия под тепловыделяющим материалом, разделяющей область с высокой эффективной теплопроводностью (с жидким натрием в каналах для теплоносителя) и область с низкой эффективной теплопроводностью (область парового пузыря в каналах). В используемом приближении влияние повышенного давления в пузыре на местоположение границы выпаривания натрия не учитывается.

Для математического описания используется расчетная схема с разбиением рассматриваемой области, внутри которой продвигается тепловыделяющая масса, на несколько зон в высотном направлении (рис.1). В соответствии с принятой физической моделью верхняя граница материала под тепловыделяющей массой будет являться одновременно фазовой границей - внешним фазовым фронтом расчетной зоны под массой. Вторым фазовым фронтом в этой зоне будет являться граница выпаривания натрия (внутренний фазовый фронт). Верх тепловыделяющего жидкого слоя рассматривается в качестве внешнего фазового фронта этой зоны.

Для описания передачи тепла внутри каждой зоны в принятой формулировке используется уравнение теплопроводности с  $\delta$ -функцией:

$$[c(x, r, T) + R_m \cdot \delta(T - T_m)] \cdot \frac{\partial T(x, r, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [\lambda_z(x, r, T) \cdot \frac{\partial T(x, r, t)}{\partial x}] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda_r(x, r, T) \cdot r \cdot \frac{\partial T(x, r, t)}{\partial r}] + q_v(x, r, t) \quad (1)$$

где  $x$  - координата в направлении перемещения ( $x = z$ );  $r$  - радиальная координата;  $t$  - время;  $T$  - температура;  $\lambda_z, \lambda_r$  - эффективный коэффициент теплопроводности в высотном и радиальном направлении соответственно;  $c$  - эффективная объемная теплоемкость;  $q_v$  - удельное тепловыделение (единицы объема);  $T_m$  и  $R_m$  - температура и эффективная величина скрытой теплоты фазового перехода на внутренней высотной границе раздела фаз.

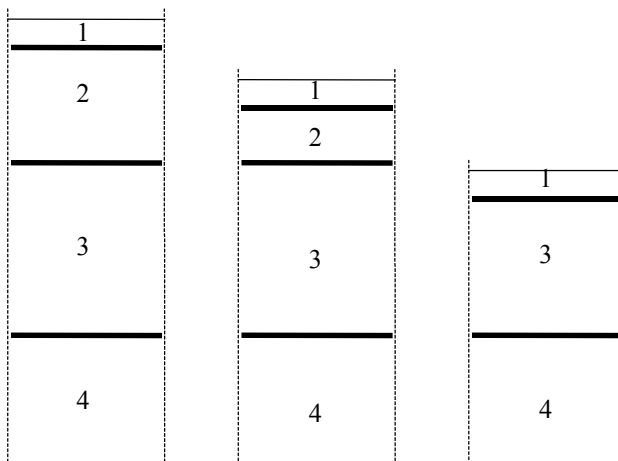


Рис. 1. Расчетная схема процесса проплавления конструкций под активной зоной тепловыделяющей массой: 1 - тепловыделяющая масса; 2 - нижняя зона воспроизводства; 3 - зона газовых полостей твэлов; 4 - зона хвостовиков ТВС

Уравнение (1) описывает передачу тепла как в однофазных областях, так и через границу раздела двух фаз, т.е. учитывает высотное движение внутреннего фазового фронта. Условие Стефана, обычно принимаемое на таком фронте, следует при  $x = y$  и, соответственно,  $T = T_m$  из одномерного случая уравнения (1) [14, 10]. Внутренним фронтом в рассматриваемой модели является граница выпаривания натрия, для которой  $T_m = T_b^{Na}$  и  $R_m = R_b^{Na_{eff}}$ . В тепловыделяющей массе внутренним фазовым фронтом будет являться граница затвердевания в нижней ее части (образующаяся в начальный момент и исчезающая после разогрева нижележащего сырьевого материала зоны воспроизводства до точки плавления), для которой  $T_m = T_m^f$  и  $R_m = R_m^f$ .

Дифференциальное уравнение (1) дополняется системой граничных условий (ГУ) на высотных границах расчетных зон. На верхней границе тепловыделяющей массы используется ГУ второго рода с нулевой плотностью теплового потока и с учетом скрытой теплоты парообразования:

$$\lambda_f(x, T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X_1^f} = R_b^f \frac{\partial X_1^f}{\partial t}; T(X_1^f, t) = T_b^f. \quad (2)$$

где  $X_1^f$  - координата верхней границы тепловыделяющей массы - внешнего фазового фронта;  $R_b^f$  - скрытая теплота кипения топлива (единицы объема).

На границе тепловыделяющей массы с нижележащей расчетной зоной используется ГУ четвертого рода с учетом скрытой теплоты плавления материала под массой (при полном удалении расплавляемого материала):

$$\begin{aligned} -\lambda_z^f(x, T) \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X_2^f} + \lambda_z^{down}(x, T) \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X_1^{down}+} = \\ = R_m^{down} \frac{\partial X_1^{down}}{\partial t}; T(X_2^f, t) = T(X_1^{down}, t) = T_m^{down}; \end{aligned} \quad (3)$$

где  $X_1^{down}$  - координата верхней границы расчетной области под тепловыделяющей массой (нижней торцевой зоны воспроизводства, зоны газовых полостей твэлов), являющейся внешним фазовым фронтом и контактирующей с топливом;  $R_m^{down}$  - эффективная скрытая теплота плавления материала под массой, равная  $R_{meff}^f$  в зоне воспроизводства,  $R_{meff}^c$  - в зоне газовых полостей. Передача тепла между расчетными зонами под массой (в том числе с натрием в хвостовиках ТВС) описывается ГУ четвертого рода.

Численное решение исходного двумерного дифференциального уравнения теплопроводности с системой граничных условий проведено методом конечных разностей. В решении в принятом приближении используется одномерная пространственная сетка с некоторым достаточным числом расчетных узлов в высотном направлении в аварийной группе ТВС. Каждый контрольный объем принимается в виде плоского круглого слоя с пространственным узлом в радиальном центре. Радиальная граница контрольных объемов определена по внутренним границам чехлов аварийной группы ТВС.

Дискретный аналог дифференциального уравнения (1), полученный методом баланса для неравномерной пространственной сетки с использованием кусочно-постоянных высотных и радиальных профилей температуры на контрольных отрезках, имеет вид:

$$A_{i,k} \cdot T_{i-1,k}^{j+1} - C_{i,k} \cdot T_{i,k}^{j+1} + B_{i,k} \cdot T_{i+1,k}^{j+1} + F_{i,k} = 0, \quad (4)$$

где  $i$  - пространственный индекс расчетной сетки в высотном направлении;  $k$  - пространственный индекс в радиальном направлении ( $k = 1$ );  $j$  - временной индекс. Коэффициенты (4) определяются как

$$A_i = \frac{\tau}{h_i \cdot h_i} \lambda_{i-1/2}^{j+1}; B_i = \frac{\tau}{h_i \cdot h_{i+1}} \lambda_{i+1/2}^{j+1}; C_i = A_i + B_i + c_i^{j+1} \quad (5)$$

$$F_i = c_i^{j+1} \cdot T_i^j + \tau \cdot q_{v_i}^{j+1} - R_m^i \cdot \frac{y^{j+1} - y^j}{h_i} - \tau \cdot \frac{4}{l_k} \cdot q_{r_{i,k+1/2}}^j,$$

где  $\tau = t_{j+1} - t_j$ ;  $h_i = x_i - x_{i-1}$ ;  $\bar{h}_i = (h_i + h_{i+1})/2$ ;  $\bar{l}_k = 2 \cdot r_{k+1/2}$ ;  $r_{k+1/2}$  - радиус грани контрольных объемов;  $y$  - координата (высотная) фазового фронта. Индекс  $k$  опущен во всех формулах (5) за исключением определяющего теплоотдачу в радиальном направлении последнего члена коэффициента  $F_i$ .

Аппроксимационное соотношение для радиального теплового потока в расчетных зонах под тепловыделяющей массой записывается в виде:

$$q_{r_{i,k+1/2}} = \lambda_{r_{i,k+1/2}} \cdot \frac{T_{i,k}^j - T_{i,k+1}^j}{l_{k+1}}, \quad (6)$$

где  $l_{k+1} = r_{k+1} - r_k$ ;  $r_k = 0$ ;  $r_{k+1}$  - координата внутренней грани чехла соседней неповрежденной ТВС. Для вычисления значений эффективных коэффициентов теплопроводности в высотном и в радиальном направлениях используются формулы из [15] соответственно:

$$\lambda_z = \sum_{p=1}^n \varepsilon_p \cdot \lambda_p; \quad \frac{l}{\lambda_r} = \sum_{p=1}^n \frac{\varepsilon_p}{\lambda_p}, \quad (7)$$

где  $\lambda_p$  - коэффициент теплопроводности  $p$ -го материала в расчетной зоне;  $\varepsilon_p$  - объемная доля  $p$ -го материала. Выбор модели параллельного и последовательного суммирования коэффициентов теплопроводности в высотном и радиальном направлениях осуществлен на основании того, что теплопроводящие компоненты под расплавом (воспроизводящий материал, сталь с оболочек твэлов, теплоноситель в каналах между твэлами) располагаются параллельно высотному направлению. Для аппроксимации радиального потока от тепловыделяющей массы используется:

$$q_{r_{i,k+1/2}} = \alpha_{r_{i,k+1/2}} \cdot (T_{i,k}^j - T_{i,k+1}^j), \quad (8)$$

где  $\alpha_r$  - коэффициент теплоотдачи от тепловыделяющей массы к теплоносителю окружающих ТВС.

В расчетном анализе продвижения расплавленной тепловыделяющей массы к напорной камере при аварии с полным прекращением расхода в отдельной ТВС быстрого реактора рассматриваются два варианта, соответствующие условиям распространения аварии на 6 соседних ТВС и ограничения аварии пределами одной первоначально аварийной ТВС. В рассматриваемом реакторе ТВС представляет собой шестигранную чехловую трубу с размером 94,5x2,5 мм, внутри которой размещаются 127 твэлов диаметром 6,6 мм. Шаг размещения ТВС в активной зоне 100 мм. Высота нижней торцевой зоны воспроизводства составляет 350 мм, длина газовой полости 670 мм. В расчетах принималось, что тепловыделяющая масса состоит из одного топлива, без стали и воспроизводящего материала, что идет в запас расчета. Плотность тепловыделения в ней принята максимальной, соответ-

ствующей плотности тепловыделения в топливе центральной ТВС. Ее номинальное значение равно  $1,82 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>. Плотность остаточного тепловыделения спустя 1 с после остановки реактора равна 4,6 % от номинальной мощности. Этот момент принят в качестве начального. Значения геометрических параметров, определяющих долю теплопередачи в радиальном направлении, соответственно двум выше-определенным вариантам, равны:

- 1)  $\bar{l}_k = 29,0$  см;  $l_{k+1} = 15,5$  см; 2)  $\bar{l}_k = 9,0$  см;  $l_{k+1} = 5,5$  см.

Величина коэффициента радиальной теплоотдачи от тепловыделяющей массы к теплоносителю окружающих ТВС рассчитана из теплового баланса эксперимента BF1 с уровнем тепловыделения  $0,15 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup>, при котором максимальная температура в расплаве была близка к температуре кипения [16]. Максимальная по высоте бассейна BF1 величина  $\alpha_r$  получена равной  $0,07 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·град). Поскольку размер сборки BF1 в 3 раза меньше ТВС быстрого реактора, такой учет не является достаточно точным. Полученные с помощью представленной модели численные результаты имеют в значительной степени качественный характер и могут рассматриваться как первое приближение.

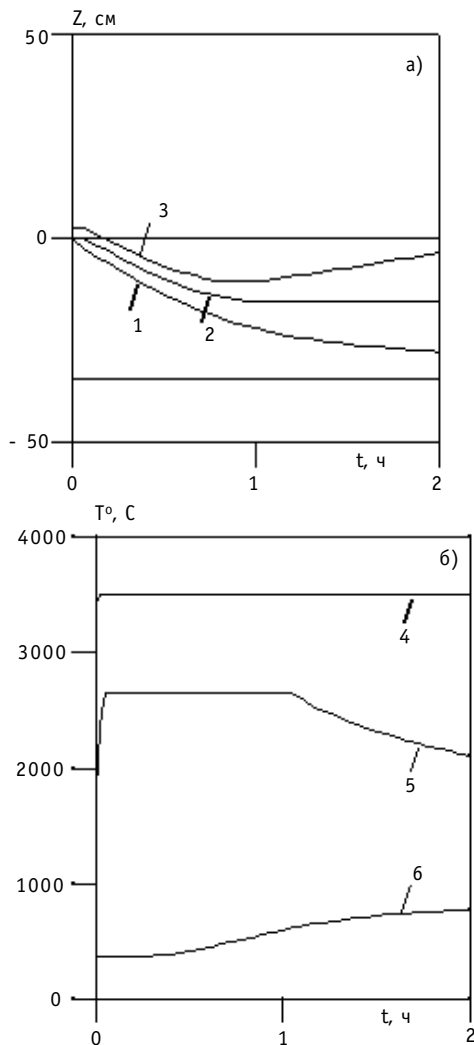


Рис. 2. Результаты расчета продвижения тепловыделяющей массы от активной зоны через нижнюю зону воспроизводства в семи ТВС: а) координаты; б) температура; 1 - глубина выпаривания натрия; 2 - глубина проплавления воспроизводящего материала; 3 - координата верха тепловыделяющего расплава; 4, 5 - температура верха и низа тепловыделяющего расплава соответственно; 6 - температура низа зоны воспроизводства

Расчетные оценки показали значительное замедление продвижения тепловыделяющей массы в ограниченном числе ТВС по сравнению с условиями без боковых потерь тепла. Получено, что в 7 ТВС тепловыделяющая масса проплавляет лишь около 1/3 части нижней зоны воспроизводства, после чего происходит прекращение движения и охлаждение расплавленного топливного слоя с одновременной постепенной конденсацией пара топлива из вышележащего парового объема. Для одной ТВС получено, что при принятых предположениях тепловыделяющая масса совсем не будет плавить нижележащие конструкции. Такой результат для случая одной ТВС качественно согласуется с результатами экспериментов серии BE+ программы SCARABEE, в которых не было движения расплава вниз после остановки реактора.

Результаты расчета движения тепловыделяющей массы в семи ТВС проиллюстрированы на рис.2. Нулевая отметка - нижняя плоскость активной зоны. Показаны глубина выпаривания натрия, проплавления воспроизводящего материала и координата верха тепловыделяющей массы. Про-

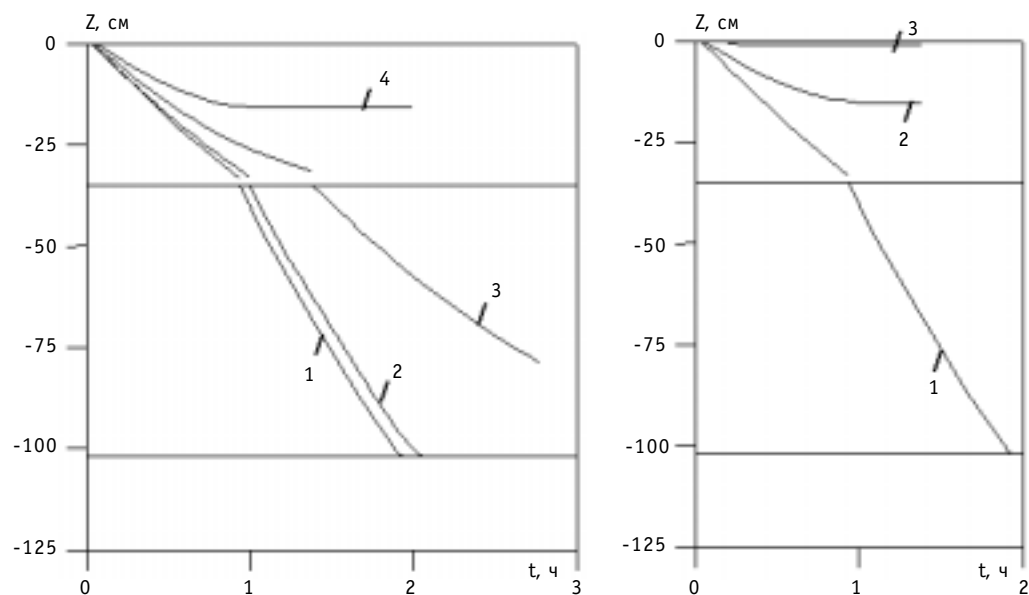


Рис. 3. Глубина проплавления материалов под активной зоной тепловыделяющей массой при разной теплоотдаче к окружающим ТВС: а) в семи ТВС; б) в одной ТВС; 1 - без учета теплоотдачи к окружающим ТВС; 2 - аппроксимация  $q_r$  от тепловыделяющей массы формулой (6) при  $\lambda_r = \lambda_{Lf}$ ; 3 -  $\alpha_r = 0,035 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ ; 4 -  $\alpha_r = 0,07 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$

плавление воспроизводящего материала продолжается, постепенно замедляясь, в пределах одного часа. Толщина слоя топлива продолжает увеличиваться и впоследствии. При этом в соответствии с принятым физическим приближением температура верхней поверхности слоя топлива поддерживается равной температуре кипения, а температура нижней поверхности начинает уменьшаться ниже температуры плавления. Тепловое влияние тепловыделяющей массы в этом случае простирается немногим далее низа зоны воспроизводства.

На рис.3 приведены результаты оценок чувствительности по отношению к фактору теплоотдачи от тепловыделяющей массы к теплоносителю окружающих неповрежденных ТВС (на рис.3  $\lambda_{Lf}$  - коэффициент теплопроводности жидкого топлива, принятый равным  $11 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  [17]). Видно, что с увеличением интенсивности радиальной теплоотдачи глубина продвижения расплава сильно уменьшается.

Таким образом, разработана приближенная модель длительного продвижения расплавленной тепловыделяющей массы от активной зоны в нижнем направлении при аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора на быстрых нейтронах. Теплоотдача в радиальном направлении (теплопроводностью и конвекцией) учтена приближенно в величине коэффициента теплоотдачи, вычисленного из теплового баланса эксперимента BF1 программы SCARABEE. Проведенные численные оценки показывают на высокую чувствительность результатов по отношению к фактору радиальной теплопередачи от расплава. Увеличение интенсивности теплоотдачи в радиальном направлении замедляет движение тепловыделяющей массы и, соответственно, глубину ее продвижения вниз в аварийной группе ТВС. Совершенствование модели будет осуществляться в направлении учета конвективных составляющих в теплопередаче от тепловыделяющей массы.



**Список литературы**

1. *Papin J., Mac dougall J., Sesny R., Stansfield R., Soussan P.* The SCARABEE total blockages test series: synthesis of the interpretation//Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet. - 1990. - Vol. 1. - P.367-376.
2. *Kayser G., Charpenel J., Jamond C., Berthoud G., Schleisiek K.* Main SCARABEE lessons and most likely issue of the sub-assembly blockage accident//Proc. Meet. on Sodium Cooled Fast Reactor Safety. - 1994. - Vol. 2. - P.146-155.
3. *Charpenel J., Kayser G., Sesny R., Trapp J.P.* Release of delayed neutron emitters in SCARABEE experiments//Proc. Meet. on Sodium Cooled Fast Reactor Safety. - 1994. - Vol. 2. - P.112-121.
4. *Jones G., Saroul J., Sesny R.* The different APL and BE+ tests within the SCARABEE programme: means used in following and evaluating the evolution of the tests - application to a test of each type//Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. - BNES, London, 1987. - Vol. 2. - P.389-394.
5. *Le Rigoleur C., Hofmann F., Stansfield R.* Review of European out- of-pile tests and analyses of molten material movement and relocation and of molten material-sodium interaction//Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, June 6-9, 1994, O-arai, Japan. - O-arai Engineering Center, 1994. - P.17-43.
6. *Schwarz M., Miller K., Duret B., Berthoud G., Tattersall R.B.* Propagation of the molten fuel out of a faulted subassembly: the SCARABEE programme and the supporting experiments - preliminary results and analysis//Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. - BNES, London, 1987. - Vol. 1. - P.257-262.
7. *Buksha Yu. and Kuznetsov I.* Current status of investigations on molten fuel-coolant interaction, material movement and relocation in LMFRs in Russia//Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, June 6-9, 1994, O-arai, Japan. - O-arai Engineering Center, 1994. - P.73-87.
8. *Власичев Г.Н., Уснин Г.Б.* Модель затвердевания перемещающегося расплавленного топлива в каналах под активной зоной при тяжелой аварии быстрого реактора//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1998. - № 3. - С.102-110.
9. *Власичев Г.Н.* Комплекс программ расчета аварийных процессов с плавлением внутрикорпусных материалов быстрого реактора//Атомная энергия. - 1994. - Т. 76. - Вып. 6. - С.459-465.
10. *Власичев Г.Н.* Метод численного решения одномерных задач Стефана двух типов//ИФЖ. - 1993. - Т. 65. - № 3. - С.332-340.
11. *Voronov S.A., Kiryushin A.I., Kuzavkov N.G., Vlasichev G.N.* Evaluation of downmotion time interval molten materials to core catcher during core disruptive accident postulated in LMFR//IAEA/IWGFR Technical Committee Meeting on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in Liquid Metal Fast Reactors, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. - O-arai Engineering Center, PNC, 1994. - P.545-551.
12. *Власичев Г.Н., Уснин Г.Б., Кузавков Н.Г.* Расчетное исследование перемещения расплавленной массы к днищу корпуса при запроектной аварии быстрого реактора//Атомная энергия. - 1994. - Т. 77. - Вып. 3. - С.180-185.
13. *Seiler J.M., Kayser G., Wilhelm D.* Synthesis of research on boiling pool thermal hydraulics at CEA and KfK//Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. - O-arai Engineering Center, PNC, 1994. - P.309-330.
14. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1977. - 736 с.
15. *Godbee H.W., Ziegler W.T.* Thermal conductivities of MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> powders to 850 °C. II.Theoretical//Journal of Applied Physics. - 1966. - Vol. 37. - №1. - P.56-65.
16. *Camous F., Breton J.P., Blundell C., Moxon D.* SCARABEE - single and two phase natural convection in sodium and molten core materials//Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. - BNES, London, 1987. - Vol. 2. - P.401-406.
17. *Финк Дж., Часанов М., Лейбовиц Л.* Теплофизические свойства двуокиси урана//Атомная техника за рубежом. - 1982. - № 11. - С.20-25.

Поступила в редакцию 15.11.99.

**УДК 51-72: 621.039.586: 536.42**

*Calculation Model of Long-Term Axial Advance of Heat-generating Mass under LMFR Accident with Fuel Assemblies Melting* \G.N. Vlasichev, G.B. Usynin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 9 pages, 3 illustrations. – References, 17 titles.

The model is developed for long-term advance of the melted heat-generating mass from the reactor core to pressure head chamber under accident with blocking of separate fuel assembly of fast reactor. The model is intended for estimation of depth and time of advance of the heat-generating mass. The model of a non-stationary effective heat conductivity is utilized for mathematical description. The approximate numerical solution of an initial two-dimensional differential heat conductivity equation with anisotropy in axial and radial directions is obtained. The numerical estimations of the fuel downward propagation from the core in one fuel assembly and in group of 7 fuel assemblies of the fast reactor are carried out.

**УДК 534.222.2:662.2**

*Refraction of Detonation Waves and Increase of Directional Effect of Explosion by Application of Collecting Lenses of Explosive Substances* \A.G. Karabash; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 5 illustrations, 1 table. – References, 4 titles.

Phenomenon of refractivity of detonation waves, set in 1945 and revealed itself in a cumulative effect of the collecting lenses in systems of condensed explosive substances with different velocity of detonation, is described in this paper.

The main regularity of the phenomenon under detonation is the analogy to the general laws of distribution of propagation undulatory processes (the Snell law etc.) is shown in the simplified theoretical model on the basis of great number of experiments.

The experimental data and new principles of increasing the directional effect of explosion were taken into account in basic researches at making RDS-1.