

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАСПЛАВЛЕНИЯ ТВЭЛА С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОЙ ОБОЛОЧКИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА БН ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ*

Г.Н. Власичев

Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород



Разработана методика расчета аварийного процесса разогрева и плавления твэла с учетом перемещения расплавленной оболочки при прекращении расхода теплоносителя в ТВС быстрого реактора с натриевым теплоносителем. Выполнено тестирование расчетной методики на численных результатах аналогичных методик. Выполнены расчеты плавления оболочки твэла, перемещения и затвердевания расплава оболочки в необогреваемых секциях, находящихся выше и ниже активной части твэла FFTF, а также в самой активной части, согласующиеся с данными эксперимента R-5 на реакторе TREAT.

Исследования аварийных процессов необходимы для выработки мер по предотвращению аварий, ограничению их последствий и доказательства безопасности нового поколения реакторов. Существующая концепция безопасности включает в себя рассмотрение в проекте ядерной энергетической установки запроектных аварий с тяжелыми повреждениями или расплавлением активной зоны [1].

В техническом обосновании безопасности реактора БН-800 показано, что при аварии с потерей энергопитания не происходит расплавления активной зоны, т.к. отрицательные обратные связи по реактивности даже в условиях кипения натрия приводят к снижению мощности [2]. Однако полностью исключить вероятность плавления части активной зоны пока невозможно [3].

В данной работе описываются методика и результаты расчетов аварийного процесса расплавления отдельного твэла реактора типа БН с учетом перемещения расплавленной оболочки. Решение задачи теплообмена в твэле с учетом плавления заключается в определении нестационарных полей температуры и координат фазовых границ в элементах твэла (рис. 1), а впоследствии и в твердых корках, образующихся на концах активной части твэла из переместившегося расплавленного материала оболочки (рис. 1б, в, 2), и в ячейке с расплавом оболочки в нижней части активной зоны, переместившимся из вышерасположенных участков (рис. 1г). В результате вычислений определяются времена расплавления оболоч-

© Г.Н. Власичев, 2001

* Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке конкурсного центра грантов по фундаментальным исследованиям в области технических наук (грант Т00-1.3-1017)

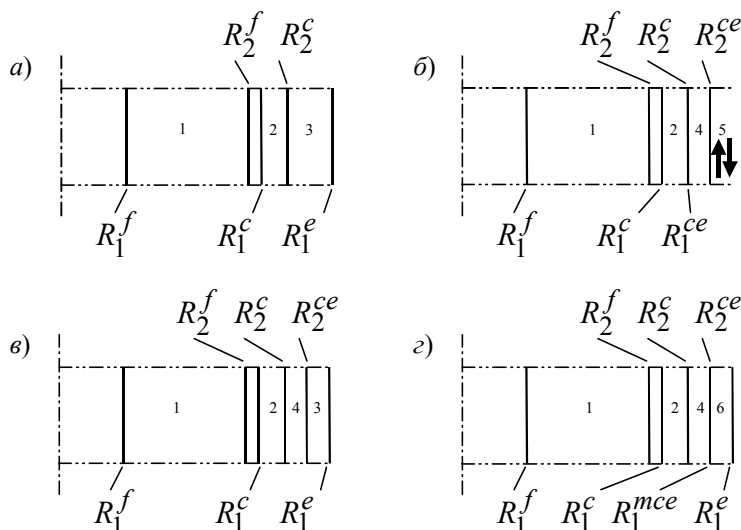


Рис. 1. Расчетные схемы радиального теплообмена в твэле на характерных высотных участках в аварийном процессе после прекращения расхода на участке с осушенной поверхностью (а), на участках с расплавленным материалом оболочки, перемещающимся вверх твердой оболочки (б), в верхней части после оттока жидкой стальной пленки (в), в нижней части с материалом оболочки, заполнившим все поперечное сечение канала (з): 1 - топливный сердечник; 2 - оболочка; 3 - пары натрия (не является расчетной областью); 4 - корка затвердевшей стали; 5 - перемещающаяся жидкая сталь (не является расчетной областью); б - неподвижная жидкая сталь

ки и топливного сердечника по высоте твэла, полной или частичной блокировки межтвэльного пространства затвердевающим материалом, а также повторного расплавления затвердевшего слоя. Времена начала и окончания перемещения расплава вверх твердой оболочки твэла выше области расплавления оболочки, начала такого перемещения ниже области расплавления и заполнения расплавом всего сечения ячейки в нижней части активной зоны определяются в результате рассмотрения аксиального перемещения расплавленного материала оболочки (рис. 2). Решение задачи перемещения заключается в определении скоростей расплава оболочки и паров натрия, координат верхней и нижней кромок расплавленного материала во времени с момента расплавления оболочки в наиболее горячем поперечном сечении до окончания движения в результате сползания расплава в бассейн над нижней блокировкой канала для прохода теплоносителя. Определяются также время смены восходящего движения на нисходящее, длина проникновения расплава, возможно, в верхнюю и в нижнюю зоны воспроизводства, а затем время образования и высота слоя из расплава оболочки над нижней блокировкой.

Данная модель является расширением модели, рассмотренной в [4]. Она дополнительно учитывает аксиальное перемещение расплавленной оболочки. Поскольку в условиях запаренной ТВС плавление оболочки на большей части твэла в активной зоне определяется, в основном, подводом тепла к оболочке изнутри твэла, то задача перемещения рассматривается с учетом динамики границ области расплавления оболочки вдоль твэла, полученной из рассмотрения в первом приближении задачи плавления оболочки. Задача перемещения рассматривается как чисто динамическая. Предполагается, что движение паров натрия и расплава оболочки - одномерное, а движущиеся среды - несжимаемые. Предполагается, что первоначально направленное вверх перемещение расплавленного материала оболочки (рис. 2а) происходит под действием силы трения от восходящего потока

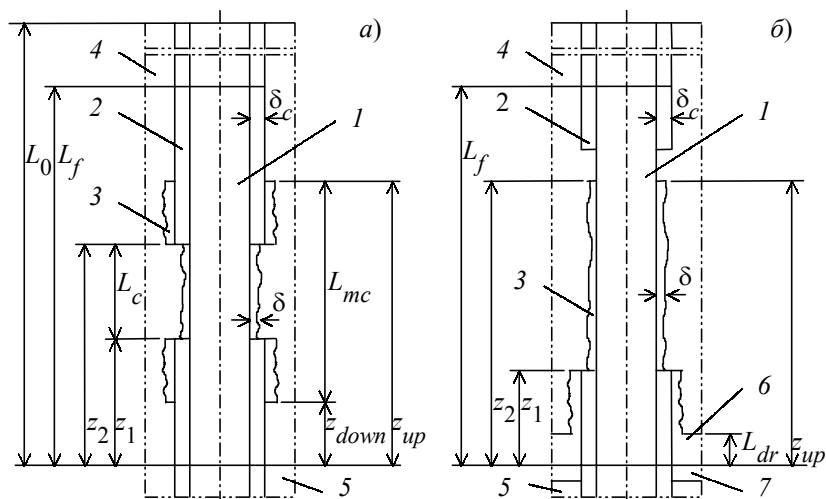


Рис. 2. Расчетные схемы перемещения расплавленной оболочки до (а) и после (б) блокировки в нижней зоне воспроизводства: 1 - топливный сердечник; 2 - оболочка; 3 - перемещающаяся пленка; 4 - пары натрия в канале; 5 - жидкий натрий; 6 - неподвижный расплав оболочки; 7 - блокировка

паров натрия, противодействующих силам тяжести и трения расплава о поверхности сердечника и нерасплавленных участков оболочки. Принимается, что расплав перемещается в виде сплошной неразрывной пленки, толщина которой одинакова по всей длине. Считается, что перемещение пленки за высотные границы области полного (по всему сечению) расплавления оболочки начинается, когда скорость течения пленки становится выше скорости распространения плавления оболочки вдоль твэла на соответствующей границе. Считается, что после смены направления перемещения (реверса) пленки и последующего оттока расплава вниз (обратно к верхней границе области расплавления оболочки) происходит отрыв пленки от вышенаходящейся еще твердой оболочки (рис. 2б). Последующее плавление указанного верхнего участка (рис. 1в) не учитывается в балансе массы.

Математические условия теплообмена в топливном сердечнике и оболочке, в зазоре между сердечником и оболочкой и с осушенной поверхности твэла описаны в [4]. Нестационарное поле температуры в топливном сердечнике твэла с объемным тепловыделением математически описывается одномерным уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат. Для описания объемного плавления используется приближение двухфазной зоны, в котором скрытая теплота учитывается в объемной теплоемкости. Поле температуры в оболочке описывается уравнением теплопроводности с введенной дельта-функцией.

На границе между оболочкой твэла и твердой коркой в данной модели используется граничное условие четвертого рода. На внешней границе твердой корки - внешнем фазовом фронте - используется условие

$$\lambda_c(r, T) \left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_2^{ce}} = R_m^c \frac{\partial R_2^{ce}}{\partial t}; \quad T(R_2^{ce}, t) = T_m^c, \quad (1)$$

где r - радиальная координата с центром на оси твэла; t - время; T - температура; λ - коэффициент теплопроводности; T_m^c и R_m^c - температура начала плавления и скрытая теплота плавления (единицы объема) материала оболочки соответственно; R_2^{ce} - радиальная координата внешней поверхности стальной корки. В данном условии отсутствует теплопередача от жидкой стальной пленки, т.к. ее температура принимается равной температуре плавления. В верхней части активной зоны

после оттока пленки вниз из рассчитываемого сечения на наружной поверхности твердой корки (если она образовалась) (рис. 1в) используется условие, принятое на осушенной оболочке до натекания на нее пленки. Для учета вытекания расплавленного материала на данном участке, оказывающего влияние на продолжительность плавления оболочки и твердой корки, в описании их плавления на границах R_1^c и R_1^{ce} соответственно используются условия для внешнего фазового фронта. Для оболочки указанные условия имеют вид

$$\alpha_1^c \cdot [T(R_2^f, t) - T(R_1^c, t)] + \lambda_c(r, T) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_1^c} = R_m^c \frac{\partial R_1^c}{\partial t}; \quad T(R_1^c, t) = T_m^c, \quad (2)$$

где индекс f относится к топливному сердечнику.

Система исходных дифференциальных уравнений, описывающая движение расплавленной оболочки и паров натрия, при вышеприведенных предположениях может быть выражена формулами из [5, 6, 7].

Уравнения количества движения и неразрывности для расплава оболочки:

$$\frac{\partial(1-\alpha)v_{mc}}{\partial t} + \frac{\partial(1-\alpha)v_{mc}^2}{\partial z} = -\frac{(1-\alpha)}{\rho_{mc}} \frac{\partial P}{\partial z} - (1-\alpha)g + \frac{\tau_g \Pi_g + \tau_{mc} \Pi_{mc}}{\rho_{mc}(A_g + A_{mc})}; \quad (3)$$

$$L_c \cdot \delta_c = L_{mc} \cdot \delta,$$

где z - высотная координата; v_{mc} - скорость пленки; ρ_{mc} - плотность расплава оболочки; P - давление; g - гравитационная постоянная; α - отношение площади проходного сечения для паров к площади поперечного сечения канала с оголенным от оболочки топливным сердечником; τ_g и τ_{mc} - касательное напряжение на внешней поверхности оболочки и на границе между пленкой и сердечником соответственно; Π_g и Π_{mc} - смоченный периметр для паров натрия и пленки; A_g и A_{mc} - площадь проходного сечения для паров и поперечного сечения пленки; L_c и L_{mc} - длина расплавленного участка оболочки и пленки; δ_c и δ - толщина твердой оболочки и пленки.

Уравнения количества движения и неразрывности для паров натрия:

$$\frac{\partial(\alpha \cdot v_g)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \cdot v_g^2)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial z} - \alpha \cdot g - \frac{\tau_g \cdot \Pi_g}{\rho_g \cdot (A_g + A_{mc})}; \quad (4)$$

$$v_g \cdot A_g = v_{gi} \cdot A_{g0},$$

где v_g - скорость паров; $v_{gi} = v_g(z=0)$; ρ_g - плотность паров.

После интегрирования по длине канала с учетом формул для касательных напряжений, коэффициентов трения и ряда упрощений уравнения движения могут быть переписаны в следующем приближенном виде [5]:

$$\frac{1}{L_c} \cdot \rho_{mc} \cdot \frac{\partial(v_{mc} \cdot L_c)}{\partial t} = -(\rho_{mc} - \rho_g) \cdot g \cdot \eta + \frac{f_s}{2 \cdot D_0} \cdot \frac{\rho_g \cdot v_{gi}^2}{(1 - \alpha_0)} \cdot \left[1 + 75 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \alpha_0) + \alpha_0 \cdot \left(\frac{L_{mc}}{L_c} - 1 \right) \right] - \frac{2 \cdot \mu_{mc} \cdot v_{mc}}{\delta_c^2} \cdot \left(\frac{L_{mc}}{L_c} \right)^2; \quad (5)$$

$$\Delta P = \rho_g \cdot g \cdot L_0 + \frac{\rho_g \cdot v_{gi}^2}{2} \left\{ \frac{f_s \cdot L_0}{D_0} \left[1 + 75 \cdot \varepsilon \cdot \frac{(1 - \alpha_0) L_c}{\alpha_0 L_0} \right] + K_{fr} \right\}, \quad (6)$$

где ΔP - перепад давления на участке канала L_0 , заполненном парами;

α_0 - геометрический параметр; D_0 - первоначальный гидравлический диаметр канала; K_{fr} - коэффициент сужения поперечного сечения канала над активной зоной затвердевшим материалом [5]; ε - параметр захлебывания [5].

Длина участка расплавленной оболочки определяется как

$$L_c(t) = z_2(t) - z_1(t), \quad (7)$$

где $z_1(t)$ и $z_2(t)$ - координаты нижней и верхней границы расплавленной области соответственно, определяемые из решения задачи плавления оболочки.

Длина участка, занятого перемещающейся пленкой

$$L_{mc}(t) = z_{up}(t) - z_{down}(t), \quad (8)$$

где $z_{up}(t)$ и $z_{down}(t)$ - координаты верхней и нижней границы пленки соответственно, определяемые так:

- до реверса

$$z_{up}(t) = \begin{cases} \int_{t_{m0}}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_{m0}), & \text{при } \int_{t_{m0}}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_{m0}) \geq z_2(t); \\ z_2(t), & \text{при } \int_{t_{m0}}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_{m0}) < z_2(t); \end{cases} \quad (9)$$

$$z_{down}(t) = z_1(t);$$

- после реверса

$$z_{up}(t) = \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_{up}(t_r);$$

$$z_{down}(t) = \begin{cases} \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_1(t_r), & \text{при } \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_1(t_r) \leq z_1(t); \\ z_1(t), & \text{при } \int_{t_r}^t v_{mc}(t) \cdot dt + z_1(t_r) > z_1(t); \end{cases} \quad (10)$$

где t_{m0} - момент начала движения; t_r - момент реверса.

После образования нижней закупорки испарение натрия в нижней части канала прекращается. Принято, что с этого времени течение паров в канале отсутствует. Последующее перемещение пленки вниз будет в таких условиях происходить под действием только сил тяжести и противодействующего трения, которое математически можно приближенно описать уравнением (5). Но в данном случае второй член правой части, содержащий v_{gi} , будет нулевым, а в третьем члене отношение L_{mc} / L_c со времени начала аккумулялирования стали над блокировкой считается неизменным. Второе условие с учетом баланса массы выражает постоянство толщины пленки d . При этом высота уровня бассейна из расплава оболочки $L_{dr}(t)$ будет определяться формулами из [5]. Расчет перемещения прекращается в момент окончания сползания жидкой пленки в бассейн, когда $L_{dr}(t) = z_{up}(t)$.

Для расчета нестационарных радиальных распределений температуры в элементах твэла с учетом плавления оболочки и топлива и аксиального перемещения расплавленной оболочки разработана версия программы TRAMS-TWEL [4, 8]. Для расчета параметров перемещения расплава оболочки с момента ее расплавления в наиболее горячем сечении разработана программа MOTE. Высотные координаты верхней и нижней границ области полного расплавления оболочки в зависимос-

ти от времени, вычисляемые на основании расчетов по программе TRAMS-TWEL, используются в качестве входных данных. Программа MOTE рассчитывает скорости перемещения расплава оболочки и паров натрия, положение верхней и нижней границ пленки при ее наплзании на нерасплавленные части оболочки, а также при использовании упрощенной модели затвердевания [5] толщину блокировок канала выше и ниже активной зоны. Полученные по TRAMS-TWEL временные зависимости толщины таких блокировок используются в качестве входных данных для более точных расчетов. Процесс расплавления твэла в активной зоне с учетом перемещения материала оболочки, затвердевания расплава на твердых участках оболочки и повторного плавления рассчитывается итерационно - повторными расчетами по программам с обменом данными через файлы на диске в соответствующих последовательности и формате.

По программе TRAMS-TWEL были выполнены расчеты плавления твэла FFTF для условий эксперимента R-5 на реакторе TREAT при значениях данных из [9]. Полученные результаты сопоставлены с приведенными в [9] численными данными аналитической модели, кода SAS (рис. 3) и кода THTB, основанного на численном решении уравнения теплопроводности (таблица). Время расплавления оболочки в наиболее теплонапряженном сечении, полученное по TRAMS-TWEL, на 8 % больше времени расплавления по коду SAS. Внизу активной части твэла возрастает отличие времен плавления, полученных по TRAMS-TWEL и аналитической модели, от таких времен по коду SAS, в котором учитывается динамика выпаривания натрия, имеющая пульсирующий характер, усиливающийся в нижней части канала. Времена расплавления оболочки твэла в центральной и верхней частях активной зоны, полученные по TRAMS-TWEL, совпадают с соответствующими временами, полученными по аналогичному коду THTB, с точностью до двух значащих цифр. В нижней части отличие возрастает до 6%. За время расплавления топлива было принято время, когда температура во внешнем узле топлива достигнет точки начала плавления, т.е. когда двухфазная зона распространится по всему поперечному

сечению. Отличие этих времен, полученным по двум кодам, составляет 19-23%. Характер изменения по высоте твэла вычисленных по TRAMS-TWEL величин вполне согласуется с данными THTB. В целом, согласие численных результатов для условий эксперимента R-5, полученных по TRAMS-TWEL, с результатами других методик можно считать достаточно хорошим. В экспериментах R-4 и R-5, отличающихся временем остановки реактора, разрушение оболочки произошло соответственно в моменты 2,75 и 2,2 с от начала кипения натрия [5]. Регистрация начала разрушения оболочки основывалась на реакции показаний расходомера на высвобождение газа. Рассчитанное по программе TRAMS-TWEL время расплавления оболочки в наиболее теплонапряженном сечении, равное

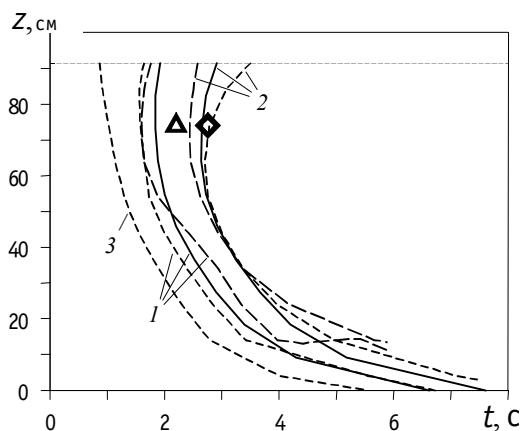


Рис. 3. Результаты расчетов плавления оболочки твэла в условиях эксперимента R-5 по коду SAS (-----), аналитической модели (-----) и программе TRAMS-TWEL (—): 1 - время начала плавления оболочки от момента выталкивания натрия из верхней части экспериментального канала после закипания; 2 - время расплавления оболочки; 3 - время осушения оболочки; Δ, ◇ - время потери герметичности оболочки в экспериментах R5 и R4 соответственно)

2,63 с, согласуется с этими данными.

Для тестирования программы MOTE проведены расчеты перемещения расплавленной оболочки твэла, в которых являющиеся входными данными координаты верхней и нижней границ области полного расплавления оболочки во времени (с момента начала кипения натрия) приняты из [5] (вычислены по модели [9]). Рассчитанные координаты верхней кромки пленки до момента полной блокировки затвердевшей сталью канала над активной зоной практически совпадают с данными [5] (рис. 4). В данном расчете толщина затвердевшего слоя определяется в каждой из двух секций над активной частью твэла FFTF по отдельности по используемой в [5] упрощенной модели – из явного выражения для полубесконечной среды [10, 5]

$$\delta_{fr} = 2 \cdot A_{fr} \cdot [a_c \cdot (t - t_{fr})]^{1/2},$$

где a_c – коэффициент температуропроводности стали; t_{fr} – время достижения границей пленки верхней необогреваемой зоны. Параметр A_{fr} определяется из сложного неявного выражения [10]. В модели [5] для вычисления A_{fr} используется явная приближенная формула. В изолирующей секции между активной частью и отражателем затвердевание рассматривается в течение ограниченного промежутка времени, требуемого для нагрева оболочки, считающейся термически изолированной от сердечника, до точки плавления –

$$\Delta t_{fr} = [\delta_c / 2A_{fr} \cdot c_c \cdot (T_m^c - T_s) / R_m^c]^2 / a_c,$$

где c_c – удельная теплоемкость стали; T_s – температура насыщения теплоносителя. В изолирующей секции материал таблетки имеет низкую теплопроводность, как у окисного топлива. В отражателе находится твердый инконель, т.е. весь материал в данной секции имеет высокую теплопроводность. В изолирующей секции длиной 2,03 см расчетная толщина слоя затвердевшего материала ограничивается величиной 0,46 мм. В нижней части отражателя образуется блокировка всего проходного сечения (толщиной 0,84 мм). Расчетная длина проникновения расплава в канал выше активной части составляет 4,85 см, что на 8% меньше приведенного в [5] расчетного значения, равного ~5,3 см. Дальнейшие события в процессе последующего нисходящего перемещения пленки из-за более быстрого образования верхней блокировки в вычислениях по программе MOTE наступают несколько быстрее, чем в [5]. Качественный ход процессов, полученный по MOTE, соответствует расчетным данным [5]. Исключение составляет только то, что в MOTE учтен скачок координаты верхней границы пленки в момент полной блокировки в зоне отражателя под эту блокаду. После достижения кромкой пленки нижней необогреваемой секции рассчитывается

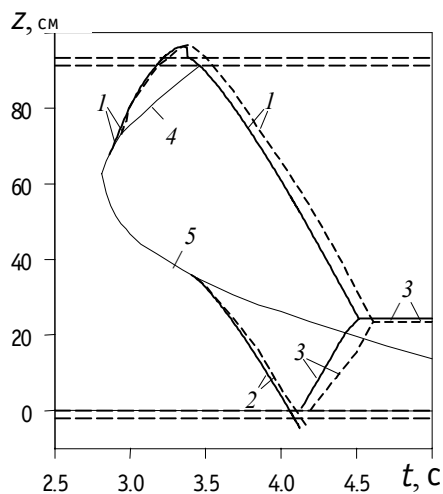


Рис. 4. Координаты верхней (1) и нижней (2) границ перемещающейся жидкой пленки из материала оболочки твэла, высота бассейна из расплава оболочки над нижней закупоркой канала (3) в условиях эксперимента R-5, полученные M. Ishii et al [5] (-----) и по программе MOTE (—) (4, 5 – верхняя и нижняя границы полного расплавления оболочки соответственно; ----- - верхняя и нижняя плоскости активной зоны, границы изолирующих секций с верхним и нижним отражателем)

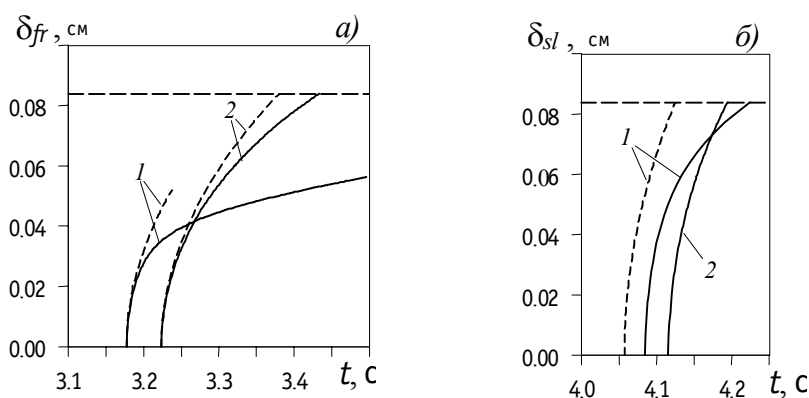


Рис. 5. Толщина слоев из затвердевшего материала оболочки в верхних (а) и нижних (б) изолирующей секции (1) и отражателе (2) по программе MOTE в соответствии с приближенной методикой из [5] (-----), по программе TRAMS-TWEL (——) (----- - ширина эффективного кольцевого канала)

толщина слоя затвердевшей стали на высоте $z = -0$. Для расчета затвердевания на данном участке используется та же модель с учетом того, что начальная температура оболочки твэла принимается равной вместо T_s температуре теплоносителя на входе в активную зону. Нижняя полная блокировка образуется в момент 4,12 с - лишь на 0,08 с быстрее соответствующего времени [5]. Длина нижней блокировки под активной зоной составляет 4,62 см, что на 10% больше расчетного значения [5], равного 4,2 см. После образования нижней блокады стекающая расплавленная оболочка аккумулируется поверх блокады на высоту около 24,2 см к моменту 4,5 с. В [5] данная высота составляет ~24 см к моменту 4,6 с. Таким образом, результаты расчета процессов перемещения расплавленной оболочки твэла и затвердевания расплава в необогреваемых секциях, выполненного по программе MOTE в соответствии с методикой [5] с теми же значениями данных, практически совпадают с приведенными в [5].

В результате расчета перемещения расплавленной оболочки твэла, в котором в отличие от предыдущего расчета толщина твердого слоя в секциях выше и ниже

Таблица

Времена плавления оболочки и топливного сердечника твэла в условиях эксперимента R-5, полученные по разным программам

z, см	Время расплавления оболочки, с		Время расплавления топливного сердечника, с	
	THTB	TRAMS-TWEL	THTB	TRAMS-TWEL
91.44	2.960	2.91	10.630	8.18
82.296	2.800	2.72	9.705	7.40
73.152	2.700	2.65	9.095	6.93
64.008	2.695	2.63	8.755	6.65
54.864	2.785	2.73	8.665	6.62
45.720	2.975	2.92	8.795	6.78
36.576	3.295	3.24	9.175	7.14
27.432	3.795	3.66	9.855	7.70
18.288	4.350	4.20	10.745	8.49
9.144	5.570	5.17	12.475	9.86
0.	8.200	7.60	15.870	12.87

активной зоны рассчитывается по программе TRAMS-TWEL, длина верхней блокировки составила 5,73 см, что на 8% выше расчетного значения [5]. Динамика толщины твердых слоев в верхних секциях показана на рис. 5а. Видно, что в соответствии с расчетом по методике настоящей работы первоначально быстрый рост толщины блокировки в изолирующей секции затем замедляется по мере нагревания оболочки. Ее максимальный поперечный размер составляет 0,56 мм. К моменту полной закупорки проходного сечения в вышенаходящейся зоне отражателя толщина твердого слоя в изолирующей секции равна 0,53 мм, что на 17% выше толщины, полученной по упрощенной модели затвердевания. Незначительное количественное различие результатов расчета затвердевания в данной секции по двум методикам подтверждает правильность сделанных в упрощенной модели предположений. В зоне отражателя качественный характер нарастания во времени толщины твердого слоя, рассчитанной по обоим методикам, одинаков. Однако количественная разница промежутков времени образования полной закупорки, равная 35%, является причиной разной длины верхних блокировок. Динамика толщины твердых слоев под активной зоной показана на рис. 5б. По уточненной методике программы TRAMS-TWEL этот параметр рассчитывался, как и наверху, в двух секциях. Получено, что раньше начинающееся застывание расплава в изолирующей секции впоследствии также отстает от имеющего более позднее начало образования твердого слоя в ниженаходящейся зоне отражателя. На динамику движения стальной пленки в данном случае влияет только время образования полной блокады. Поскольку такая блокада образуется первоначально на глубине $z = -2,03$ см, а не непосредственно под активной зоной, то и длина нижней блокировки, равная 7,39 см, получена большей (в 1,6 раз), чем в предыдущем расчете. Высота стального бассейна в данном случае равна 21,6 см (к моменту 4,6 с).

Качественный ход рассматриваемых процессов, полученный по программе MOTE, в котором входные данные (координаты границ области полного расплавления оболочки во времени) получены по программе TRAMS-TWEL, также соответствует расчетным данным [5], только вычисленные по MOTE параметры движения пленки и характерные времена сдвинуты во времени (вслед за координатами границ расплавления оболочки). Количественная разница в указанных входных данных привела к изменению длины верхней и нижней блокировок - 6,62 см и 8,38 см соответственно.

Результаты последнего расчета перемещения использованы для расчетов затвердевания стальной пленки в активной зоне (рис. 6). В верхней части активной зоны расплав опережает границу области расплавления оболочки недостаточно для сколько-нибудь "ощутимого" расчетной моделью затвердевания расплава на этом участке. В нижней части активной зоны расплав затвердевает на оболочке, твердой по всей толщине, начиная с высотной координаты около 11,5 см (рис. 6б). В верхней своей части блокировка канала неполная (нарастание твердого слоя прекращается ко времени нагрева оболочки до точки плавления), к низу она толще. Перед началом застывания жидкой стали в нижнем отражателе в момент 3,81 с максимальная толщина твердого слоя в активной зоне равна 0,53 мм (63% от толщины полной блокировки) на участке, находящемся на высоте $z = 2,5$ см. Полная блокировка проходного сечения на длину 1,4 см от нижней плоскости активной зоны наступает к моменту 4,36 с - позднее полной закупорки в отражателе в точке $z = -2,03$ см во время 3,89 с и полной закупорки в изолирующей секции в точке $z = -0$ см во время 3,94 с. Позднее под действием номинального тепловыделения в топливе происходит обратное расплавление твердого слоя в канале над нижней плоскостью активной зоны после расплавления оболочки во времена,

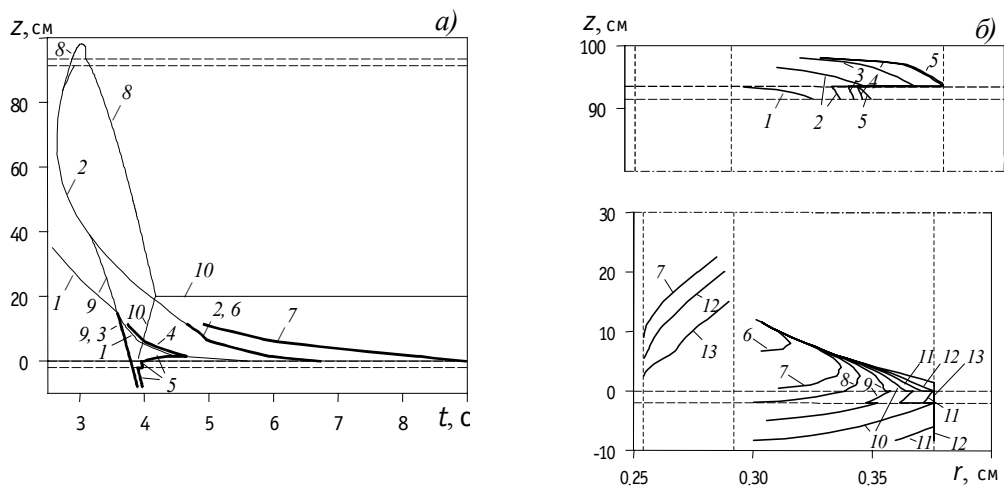


Рис. 6. Характерные времена (а) в процессе расплавления оболочки по высоте твэла в условиях эксперимента R-5: начала (1) и окончания (2) плавления оболочки, начала (3) и окончания (4) затвердевания расплава в нижней части активной зоны, полной блокировки канала под активной зоной и в нижней ее части (5), начала (6) и окончания (7) плавления твердых корок (8, 9 - верхняя и нижняя границы перемещающейся жидкой пленки из материала оболочки соответственно; 10 - высота бассейна из расплава оболочки над нижней закупоркой канала; ----- - границы секций по высоте твэла), расположение фронтов расплавления оболочки твэла и затвердевания ее расплава в эффективном кольцевом канале в ряд моментов времени (б): 2,88 (1), 2,95 (2), 3,02 (3), 3,08 (4), 3,15 (5), 3,70 (6), 3,78 (7), 3,81 (8), 3,85 (9), 3,89 (10), 3,94 (11), 4,00 (12), 4,36 с (13) (----- - внутренний и наружный радиус оболочки, наружный радиус кольцевого канала)

показанные на рис. 6а.

В эксперименте R-5 для сохранения состояния с переместившейся оболочкой энерговыделение было прервано перед плавлением топлива в момент 5,5 с после начала кипения теплоносителя [5]. Поэтому вся сталь должна застыть в конфигурации, сложившейся к этому времени. Действительная длина верхней блокировки оказалась меньше 1 см, что меньше расчетных значений. В добавление к неопределенности перепада давления во время плавления и перемещения оболочки любая блокада может расплавиться благодаря аксиальной теплопередаче, не рассматриваемой в расчетных методиках. Длина нижней блокировки, полученная в [5] равной 4,2 см, находится в хорошем согласии с результатами анализа экспериментов. Длина этой блокировки, полученная по методике настоящей работы равной 8,38 см, примерно в 2 раза превосходит экспериментальный размер, что удовлетворительно соответствует опытному результату. В целом, полученные в результате расчетов перемещения и затвердевания расплавленной оболочки твэла конфигурация, длины слоев из застывшей стали выше и ниже обогреваемого участка удовлетворительно соответствуют данным эксперимента R-5.

Таким образом, выполнено тестирование разработанных программ расчета плавления твэла и перемещения расплавленной оболочки TRAMS-TWEL и MOTE соответственно на численных результатах методик, аналогичных используемым в данных программах. Результаты расчетов плавления оболочки твэла, перемещения и затвердевания ее материала в целом качественно и количественно удовлетворительно согласуются с данными эксперимента R-5 на реакторе TREAT.

Литература

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89 // Атомная энергия. - 1990. - т. 69. - вып. 6. - с.409-422.
2. Сценарий и последствия аварии LOFWS в реакторе БН-800 Южно-Уральской АЭС / *И.А. Кузнецов, В.М. Поплавский, Ю.Е. Швецов и др.*: Доклад на семинаре по безопасности реакторов на быстрых нейтронах. СНГ - Европейское Сообщество. г. Обнинск - г. Актау, 24 - 29 февраля 1992 г. - 24 с.
3. *Buksha Yu.* On Approaches Applied Analysis of Melt-down Accident in BN-800 Type Reactor: Proc. IAEA/TWGFR 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.541-544.
4. *Власичев Г.Н.* Расчетный анализ экспериментов по разрушению электрообогреваемых имитаторов твэлов ядерных реакторов // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 2000. - № 4. - С. 28-37.
5. *Ishii M., Chen W.L., Grolmes M.A.* Molten Clad Motion Model for Fast Reactor Loss-of-flow Accidents // Nuclear Science and Engineering. - 1976. - V. 60. - №. 4. - P. 435-451.
6. *Chen W.L., Ishii M., Grolmes M.A.* Parametric Study of the Molten-Clad Motion Based on One-dimensional Model // Nuclear Engineering and Design. - 1977. - V. 41. - P.1-12.
7. *Делайе Дж., Гуо М., Ритмюллер М.* Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 424 с.
8. *Власичев Г.Н.* Комплекс программ расчета аварийных процессов с плавлением внутрикорпусных материалов быстрого реактора // Атомная энергия. - 1994. - Т. 76. - Вып. 6. - С. 459-465.
9. *Chen W.L., Ishii M., Grolmes M.A.* Simple Heat Conduction Model with Phase Change for Reactor Fuel Pin // Nuclear Science and Engineering. - 1976. - V. 60. - №. 4. - P. 452-460.
10. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - 488 с.

Поступила в редакцию 30.08.2001

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 681.5:621.165

Electronic System of Erosion Forecasting of Turbine Rotor Blade of Nuclear Power Plants \ K.V. Dergachev; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 10 pages, 4 illustrations, 1 table. - References - 9 titles.

The structure, functional scheme and characteristics of calculating complex intended for prediction of erosion of NPP turbine rotor blade are considered in this paper.

УДК 681.332

Designing of Ultrasonic Defectoscop SK26 Core on the basis of Multiprocessor System \ S.V. Michailov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 4 tables. - References - 5 titles

Method of the ultrasonic defectoscop SK26 core designing by way of multiprocessor system on the basis of digital signal processors ADSP-21XX has been presented. Local bus classification of multiprocessor system has been proposed.

УДК 621.039.586 : 536.42

Calculation Model of Pin Meltdown subject to Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident / G.N. Vlasichev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 11 pages, 6 illustrations, 1 table. - References, 10 titles.

The technique of account of emergency process of pin heating and melting is developed in view of molten cladding relocation at the termination of coolant flow in fuel assembly of the fast reactor with sodium coolant. Meltdown times of pin cladding and fuel on height of separate fuel pin, complete or partial blocking of the channel by a freezing material, and also repeated meltdown of the solidified layer are determined as a result of calculations. Testing of the developed programs of account of fuel pin melting and molten cladding moving TRAMS-TWEL and MOTE according to numerical results of techniques similar used in given programs is executed. The accounts of fuel pin cladding melting, cladding melt moving and freezing in not heated sections, taking place above and below active part of FFTF pin, and also in the most active part are executed. As a whole, received as a result of accounts a configuration, the lengths of layers from the solidified steel are higher and below heated site satisfactorily correspond to the data of R-5 experiment on TREAT reactor.

УДК 621.311:621.039

Temporary Closing-down of Condensate-feed Channel and Steam Generators of Power Units with the using of Octadecylamine \ E.B. Gromov; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 6 pages, 1 illustration, 3 tables. - References - 4 titles.

Results of development, improvement and assay of technology of the temporary closing-down of heat-and-power engineering equipment with using of film-forming amines and, in particular, octadecylamine

УДК 621.039.519

Measurement of radionuclide yields produced in 2.6 GeV proton irradiated nat-W \ Yu.E. Titarenko, E.I. Karpikhin, V.F. Batyaev, A.B. Koldobsky, B.M. Zhivun, R.D. Mulambetov, C.V. Kvasova, D.V. Fischenko; Editorial board of journal "Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2001. - 13 pages, 2 illustrations, 2 table. - References - 23 titles.

Radionuclide yields are measured in natural tungsten thin target irradiated with 2.6 GeV protons. The measurements were carried out using direct gamma-spectrometry of samples irradiated via U10 ITEP synchrotron. In total, 129 yields were defined, including 10 independent, 9 independent