

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗРУШЕНИЮ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАЕМЫХ ИМИТАТОРОВ ТВЭЛОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ*

Г.Н. Власичев

Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород



Разработаны методика и компьютерная программа для расчета аварийного процесса разогрева и плавления цилиндрических твэлов ядерных реакторов. Проведен расчетный анализ вне реакторных экспериментов, выполненных на специальном теплофизическом стенде путем электрического нагрева одиночных имитаторов твэлов. Результаты экспериментального моделирования использованы для проверки методики расчета теплообмена в твэле с учетом плавления оболочки и топливного сердечника.

Существующая концепция безопасности включает в себя рассмотрение в проекте ЯЭУ запроектных аварий, раньше считавшихся гипотетическими. В правилах ядерной безопасности реакторных установок ПБЯ РУ АС-89 [1], конкретизирующих требования ОПБ-88 в части обеспечения ядерной безопасности, устанавливается необходимость рассмотрения (в разделе технического проекта "Техническое обоснование безопасности РУ") в числе запроектных аварий аварии с тяжелыми повреждениями или расплавлением активной зоны. Также должны быть приведены условия, при которых возможно плавление топлива и/или превышение удельной пороговой энергии разрушения твэлов.

В данной работе описываются расчетная методика и результаты расчетного анализа экспериментов, моделирующих разрушение твэлов ядерных реакторов с плавлением оболочки и топливного сердечника. Экспериментальные исследования проводились во вне реакторных условиях на специальном теплофизическом стенде кафедры ЯР и ЭУ путем электрического нагрева одиночных имитаторов твэлов. Схема стенда и методика проведения экспериментов приводились в статьях [2, 3]. Использовались имитаторы из столбика таблеток высотой 80-100 мм, имеющих центральное отверстие и размещенных в металлической оболочке. Использовались методы прямого и непрямого нагревания электрическим током, проходящим непосредственно через сердечник [4] и через осевой стержень-нагреватель. Разработана методика расчета аварийного процесса разогрева и плавления цилиндрических твэлов ядерных реакторов. Разработанная компьютерная программа использовалась для расчетного сопровождения экспериментов. С по-

© Г.Н. Власичев, 2000

** Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования РФ по программе 006 "Научные исследования высшей школы в области топлива и энергетики"*

мощью ряда версий программы выполнялись предварительный анализ условий моделирования разрушения твэлов, представленный в статье [2], и расчетный анализ проведенных экспериментов с прекращением подачи охлаждающего газа и экспериментов с подъемом мощности. Результаты экспериментального моделирования использованы для проверки методики расчета теплообмена в твэле с учетом плавления оболочки и топливного сердечника.

Расчетная модель динамики разогрева и плавления твэлов описывает нестационарный теплообмен в отдельном цилиндрическом твэле с учетом плавления оболочки и топлива после осушения оболочки от теплоносителя при аварии с прекращением расхода. Может быть рассмотрен начальный этап теплообмена в твэле при подъеме мощности (до начала разрушения). Модель описывает указанные процессы и в условиях внереакторных экспериментов. Времена плавления оболочки и сердечника твэла по всей высоте нагреваемой части определяются расчетами по разработанной программе TRAMS-TWEL поочередно в ряде поперечных сечений на разных высотных уровнях.

В модели пренебрегается конвективной передачей тепла в расплавленных слоях материалов, что справедливо при малой толщине расплава [5]. Расчет теплопередачи в радиальных зазорах производится по стационарной модели - с учетом газовой и лучистой составляющих. Доля лучистой составляющей теплообмена в зазорах сильно возрастает при подъеме температуры до точки плавления, особенно между нагревателем и сердечником имитатора. Величина коэффициента теплопередачи в зазоре внутри реального твэла, подвергнутого облучению, может быть принята равной значению, вычисленному предварительно с учетом контактной проводимости. В рассматриваемом в данной модели разогреве твэла сверх нормальной температуры к величине такого коэффициента может быть добавлена составляющая теплопередачи посредством излучения. В данной версии модели расчеты напряженно-деформированных состояний твэла не производятся, расчет теплообмена продолжается до полного расплавления оболочки и топлива в рассматриваемом сечении. В соответствии с экспериментальными данными механизмом разрушения оболочки твэла (и его разгерметизации) со свежим топливом и облученного твэла, не имеющего значимого перепада давлений на оболочке, является плавление оболочки [6, 7]. Доля расплавленного объема в поперечном сечении перед разрушением сердечника твэла из свежего топлива может достигать 90% [8]. Разрушение облученного топлива при быстром подъеме мощности и соответственно высокой скорости нагрева начинается, когда эта доля намного меньше (даже при твердом топливе) [8].

В данной модели расчетная схема твэла состоит из двух областей (рис. 1). Одна расчетная область включает в себя топливный сердечник, вторая - оболочку. В случае имитатора с осевым нагревателем добавляется еще одна область.

Нестационарное поле температуры в топливном сердечнике твэла с объемным тепловыделением математически описывается уравнением

$$c_p(r, T) \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(r, T) \cdot r \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r}] + q_v(r, t), \quad (1)$$

где r - радиальная координата с центром на оси твэла; t - время; T - температура; λ - коэффициент теплопроводности; c_p - объемная теплоемкость; q_v - удельное тепловыделение (единицы объема). Для описания объемного плавления используется приближение двухфазной зоны, в котором скрытая теплота учитывается в объемной теплоемкости (как, например, в [9]) по формуле

$$c_{p_{SL}} = R_m / \Delta T_m + [c_{p_S}(T_m) + c_{p_L}(T_m + \Delta T_m)] / 2, \quad (2)$$

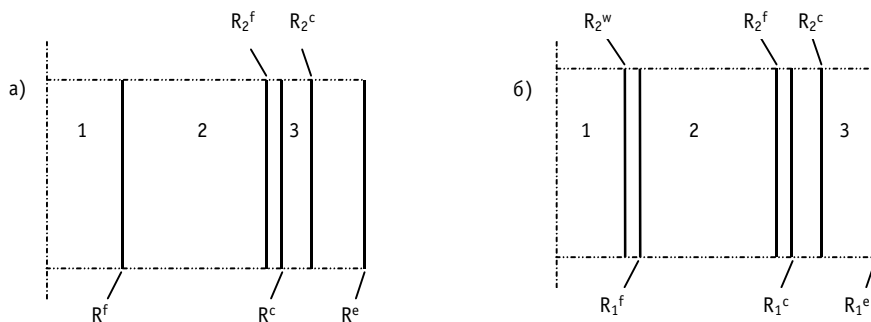


Рис. 1. Расчетные схемы твэла и имитатора с прямым электронным нагревом а), имитатора с непрямым электронным нагревом б): 1 - стержень-нагреватель; 2 - топливный сердечник; 3 - оболочка

где T_m - температура начала плавления; R_m - скрытая теплота плавления единицы объема; ΔT_m - перепад температуры в двухфазной зоне; L , S , SL - индексы жидкой фазы, твердой фазы и двухфазной зоны соответственно.

Поле температуры в оболочке описывается уравнением с дельта-функцией

$$[c_p(r, T) + R_m \cdot \delta(T - T_m)] \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda(r, T) \cdot r \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r}] + q_v(r, t). \quad (3)$$

В данном уравнении слагаемое с δ -функцией не равно нулю на границе раздела фаз внутри оболочки (внутреннем фазовом фронте) при ее плавлении.

Приведенные уравнения используются и в случае имитатора твэла. В случае имитатора с осевым нагревателем для описания поля температуры в топливном сердечнике при его плавлении используется модель с классической границей раздела двух фаз, выражаемая уравнением (3).

Передача тепла между сердечником и оболочкой математически описывается граничными условиями третьего рода:

$$\begin{aligned} -\lambda_f(r, T) \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_2^f} &= \alpha_2^f(t) \cdot [T(R_2^f, t) - T(R_1^c, t)], \\ \alpha_1^c(t) \cdot [T(R_2^f, t) - T(R_1^c, t)] &= -\lambda_c(r, T) \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=R_1^c}, \end{aligned} \quad (4)$$

где индексы f и c относятся к топливному сердечнику и оболочке соответственно; 1 и 2 - к их внутренней и внешней границам. Значения коэффициентов стационарной теплопередачи связываются условием баланса

$$\alpha_1^c(t) = \alpha_2^f(t) \cdot (R_2^f / R_1^c). \quad (5)$$

Пренебрежение таким балансом вносит существенную погрешность в случае широких зазоров, которые могут использоваться в имитаторах твэлов.

Величина коэффициента теплопередачи в зазорах вычисляется по следующим известным формулам [10]:

$$\alpha_{\text{gap}}(t) = \alpha_g + \alpha_r; \quad \alpha_g = \frac{\lambda_g}{R_{\text{gap}}^i \cdot \ln(R_{\text{gap}}^e / R_{\text{gap}}^i)}; \quad \alpha_r = \frac{q_{sr}}{T(R_{\text{gap}}^i, t) - T(R_{\text{gap}}^e, t)}, \quad (6)$$

где α_g - коэффициент теплоотдачи единицы внутренней поверхности кольцевого зазора за счет теплопроводности газа; λ_g - коэффициент теплопроводности газа в зазоре; R_{gap}^i и R_{gap}^e - радиусы внутренней (выпуклой) и внешней (вогнутой) поверхностей зазора соответственно; α_r , q_{sr} - коэффициент теплоотдачи и плотность теплового потока за счет лучистого теплообмена.

Величина плотности теплового потока лучеиспусканием рассчитывается по закону Стефана-Больцмана [11]

$$q_{sr} = \sigma \cdot \varepsilon_{np} \cdot \left\{ [T(R_{gap}^i, t)]^4 - [T(R_{gap}^e, t)]^4 \right\} \quad (7)$$

где $\varepsilon_{np} = \frac{1}{1/\varepsilon_i + (R_{gap}^i/R_{gap}^e) \cdot (1/\varepsilon_e - 1)}$ - приведенная степень черноты [12]; ε_i и ε_e - степени черноты внутренней и внешней поверхностей зазора соответственно; σ - постоянная Стефана-Больцмана.

В случае имитатора с осевым нагревателем для описания теплопередачи в зазоре между нагревателем и сердечником используются граничные условия, аналогичные (4), условие (5) и формулы (6) и (7).

На внешней поверхности оболочки используется граничное условие

$$-\lambda_c(r, T) \cdot \left. \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right|_{r=R_2^c} = \alpha_2^c(t) \cdot [T(R_2^c, t) - T_e], \quad (8)$$

где T_e - температура среды, к которой отводится тепло. Подобное условие используется также на поверхности оголенного сердечника после расплавления оболочки и удаления ее расплава из рассчитываемого высотного участка.

В величине коэффициента теплоотдачи с поверхности твэла и имитатора в общем случае учитываются конвективная и лучистая составляющие

$$\alpha_2^c = \alpha_k + \alpha_r. \quad (9)$$

Значения коэффициента конвективной теплоотдачи α_k с поверхности твэла охлаждающим теплоносителем - однофазным либо двухфазным, а также потоком паров теплоносителя после осушения оболочки либо в случае имитатора твэла охлаждающим газом могут быть рассчитаны по известным формулам. Величина плотности потока лучеиспусканием рассчитывается по формуле

$$q_{sr} = \sigma \cdot \varepsilon_{np} \cdot k_{rad} \cdot \left\{ [T(R, t)]^4 - T_e^4 \right\}, \quad (10)$$

где R - радиус твэла ($R = R_2^c$, при отсутствии оболочки $R = R_2^f$); k_{rad} - коэффициент излучения, учитывающий ослабление излучения с поверхности отдельного твэла окружающими твэлами в пучке.

В экспериментах с имитаторами твэлов типа БН с сердечником из легкоплавкой керамики (окись хрома) при прекращении расхода газа (аргона) получено расплавление оболочки при начавшемся плавлении топлива [3].

В эксперименте, проведенном при линейной мощности электронагрева, равной 15 кВт/м (среднее значение по длине имитатора), в момент 0,75 с после прекращения расхода началось локальное вздутие оболочки на участке, находящемся на расстоянии около 20 мм от нижнего конца имитатора. В его середине вздутие оболочки отмечено в момент 1,25 с. Примерно в это же время температура поверхности в средней части, измеренная пирометром, и рассчитанная температура (рис. 2а) достигают точки плавления стали. Расчетное время расплавления оболочки составляет 3,6 с после прекращения расхода. Кинограмма [3] показала, что ко времени 2,5-3 с оболочка в середине имитатора уже расплавлена. Во время рассматриваемого эксперимента плавление керамики во внутренних слоях сердечника, по-видимому, приводило к возрастанию давления из-за увеличения ее объема в процессе перехода в состояние с меньшей плотностью. В результате происходил разрыв твердых периферийных слоев и выдавливание жидкой массы с последующим ее затвердеванием на периферии. На фотографиях сердечника

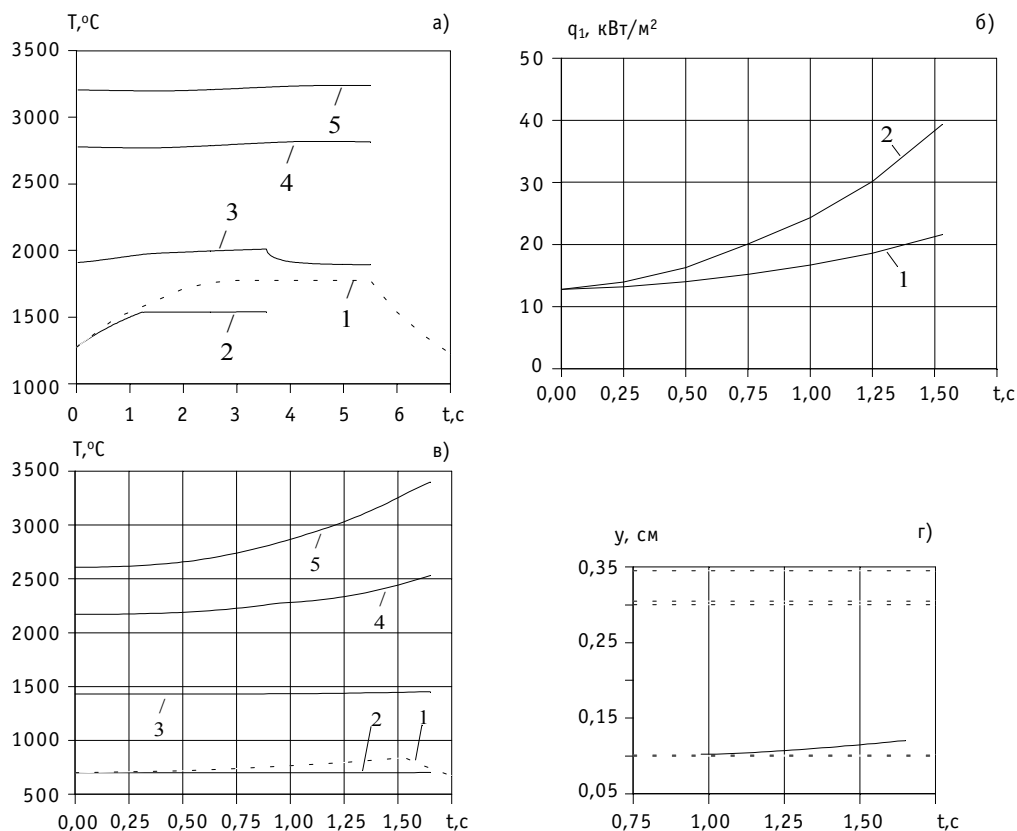


Рис. 2. Моделирование плавления имитатора твэла типа БН с сердечником из окиси хрома в условиях экспериментов с прекращением расхода (а) и с повышением мощности (б, в, г): а, в) температура в имитаторе: 1 - температура поверхности, измеренная в экспериментах; 2, 3, 4, 5 - расчетная температура наружной поверхности оболочки, наружной и внутренней поверхностей сердечника и в нагревателе соответственно; б) линейная мощность имитатора: 1 - имеющая место в эксперименте, средняя по длине; 2 - принятая в расчете, локальная; г) расчетная координата границы раздела жидкой и твердой фаз в сердечнике: горизонтальные пунктирные линии - радиусы элементов имитатора

после эксперимента [3] отчетливо видны трещины в таблетках с затвердевшим расплавом керамики в трещинах и зазорах между таблетками. Термическим взаимодействием расплавленной керамики с оболочкой можно объяснить более раннее по сравнению с расчетами проплавление оболочки и вышеупомянутое образование вздутий на ней. После расплавления оболочки температура наружной поверхности таблеток стабилизировалась на уровне около 1800°C . Расчетная установившаяся температура оголенного сердечника равна 1890°C (рис. 2а). Расчетная температура нагревателя ниже точки плавления вольфрама, равной примерно 3400°C [13], в начальный момент и в процессе последующего разогрева имитатора (рис. 2а). В эксперименте к моменту 5,5 с произошло перегорание нагревателя в верхней части. Его причиной, по всей видимости, является вытекание расплава из зазора вниз вдоль стержня. На фотографиях поперечных шлифов [3] видны каверны вокруг нагревателя в верхней и средней частях. В нижней части, где собирается расплав из верхних участков, такой каверны нет.

В эксперименте с подъемом мощности по квадратичному закону, начиная от $12,8 \text{ кВт/м}$, без прекращения циркуляции газа разрушение имитатора такой же конструкции произошло иначе, чем в вышеописанном случае. Температура оболочки повысилась с 700 только до 850°C , однако произошло локальное проплавление оболочки в двух местах и выброс наружу расплавленной керамики. За время $1,55 \text{ с}$ достигнут уровень линейной

мощности 21,6 кВт/м, после чего перегорел вольфрамовый нагреватель. Первый выброс расплавленной массы наблюдался в средней части имитатора через 1 с, второй - примерно через 1,25 с после начала подъема мощности. Механизмом разрушения оболочки в этом случае являлось ее проплавление расплавленной керамикой из внутренних слоев сердечника. В расчетах, проведенных при средних по длине значениях линейной мощности, меняющихся во времени, как в эксперименте, толщина расплавленного слоя сердечника в реальный момент перегорания нагревателя (1,55 с) составляет всего лишь 0,015 мм, а температура нагревателя намного ниже точки плавления (равна 2860°C). Расчеты, проведенные при возможной локальной скорости подъема линейной мощности, превышающей скорость повышения средней по длине величины (рис. 2б), дают в результате характер и количественные параметры динамики температурного состояния имитатора, соответствующие данным эксперимента. Расчетная температура сердечника (рис. 2в) достигает точки плавления (около 2270°C [14]) к моменту 0,92 с. Температура нагревателя достигает точки плавления к 1,65 с, т.е. примерно ко времени его пережога в эксперименте. К этому времени радиус зоны расплавленного материала в сердечнике, требующегося для реализации вышеописанного механизма разрушения оболочки, составляет 1,2 мм (рис. 2г).

В экспериментах по разрушению имитаторов твэлов БН со штатными материалами

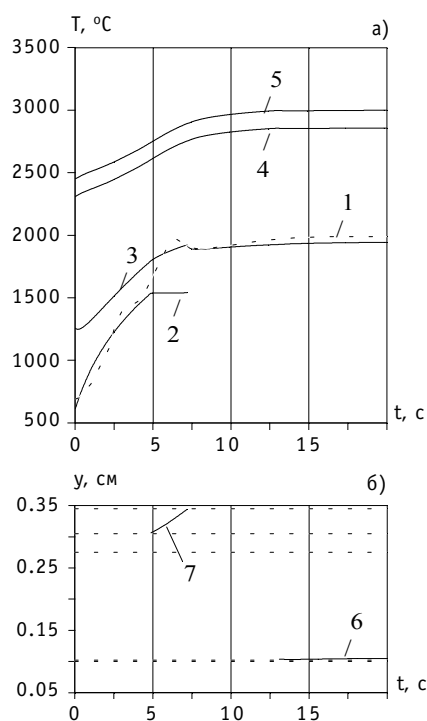


Рис. 3. Температура а) и координаты границ раздела фаз б) в имитаторе твэла БН с сердечником из диоксида урана в условиях эксперимента с прекращением расхода при мощности электронгрева 19 кВт/м: 1 - температура поверхности имитатора, измеренная пирометром; 2, 3, 4, 5 - расчетная температура наружной поверхности оболочки, наружной и внутренней поверхностей сердечника и в нагревателе; 6, 7 - расчетные границы расплавления в сердечнике и в оболочке

сердечника и оболочки (диоксид урана и сталь) при прекращении расхода охлаждающего газа (гелия), описываемых в статье [15], получено расплавление оболочки до начала частичного плавления топлива.

В эксперименте при линейной нагрузке 19 кВт/м и ширине зазора 0,3 мм между топливом и оболочкой после прекращения подачи газа температура в средней части, измеряемая пирометром, стала резко возрастать и через несколько секунд стабилизировалась на величине около 1990°C. Оболочка имитатора была расплавлена полностью, основная ее часть стекла вниз и застыла. Рассчитанные значения температуры поверхности оболочки и после ее расплавления значения температуры сердечника хорошо соответствуют экспериментальным значениям, измеренным пирометром (рис. 3а). Расчетное значение стабилизированной температуры поверхности оголенного от оболочки сердечника составляет 1943°C, что отличается на 2% от экспериментальной. Частичное плавление диоксида урана (при температуре около 2850°C [16]) происходит после расплавления оболочки (рис. 3б) и не влияет на ее разрушение, механизмом которого в данном случае явилось плавление за счет теплового потока от твердой поверхности сердечника.

В эксперименте при линейной нагрузке 23

кВт/м и ширине зазора 0,1 мм между топливом и оболочкой движение расплавленной оболочки началось в нижней части примерно через 6 с после прекращения расхода. Процесс разрушения оболочки по всей длине продолжался 1,5-3 с. В результате оболочка была расплавлена почти полностью. Динамика расчетных значений температуры поверхности качественно и количественно соответствует измеренным в эксперименте величинам в средней части имитатора (рис. 4а). Рассчитанное значение стабилизированной температуры выше экспериментального на 12%. По расчетам плавление оболочки начинается в нижней части (рис. 4г) в момент 4,4 с и заканчивается в момент 6,3 с, т.е. приблизительно в вышеуказанное время начала движения расплава в эксперименте. В верхней части имитатора расчетное время расплавления оболочки на 2,3 с превышает время расплавления в нижней части, что достаточно хорошо соответствует вышеприведенной продолжительности разрушения оболочки по ее длине в эксперименте. По расчетам плавление топливного сердечника начинается после расплавления оболочки в том же

поперечном сечении. Динамика роста расплавленной области показана на рис. 4б и 4д. Конечный радиальный размер расчетной зоны расплавления равен 1,4 мм, что несколько ниже измеренного после эксперимента радиуса централь-

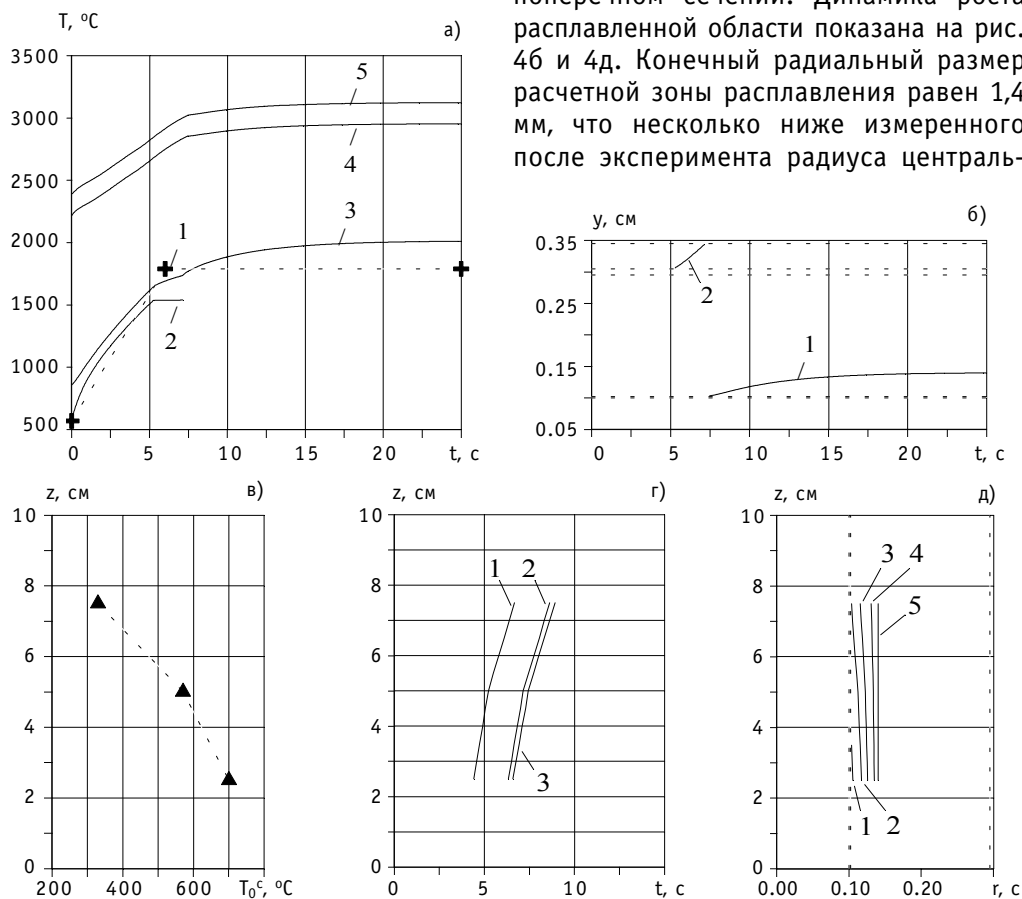


Рис. 4. Моделирование плавления имитатора твэла БН с сердечником из диоксида урана в условиях эксперимента с прекращением расхода при мощности электронагрева 23 кВт/м: а) температура: 1 - температура поверхности, измеренная пирометром; 2, 3, 4, 5 - расчетная температура наружной поверхности оболочки, наружной и внутренней поверхностей сердечника и в нагревателе; б) расчетные координаты границ раздела фаз: 1, 2 - границы расплавления в сердечнике и в оболочке; в) начальные значения температуры поверхности имитатора; г) расчетные характерные времена: 1, 2 - время начала и окончания плавления оболочки соответственно; 3 - время начала плавления сердечника; д) расчетные положения границы раздела фаз: 1, 2, 3, 4, 5 - $t = 7, 9, 11, 15, 30$ с соответственно; вертикальные пунктирные линии - радиусы внутренней и наружной поверхностей сердечника

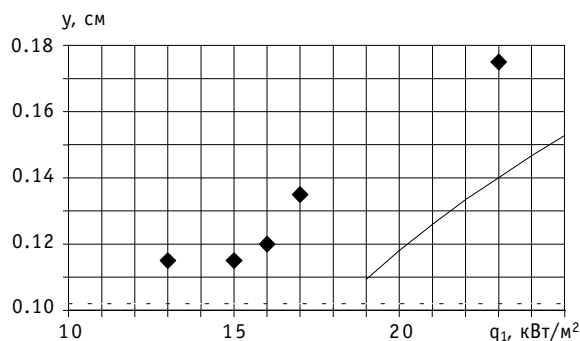


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные размеры области расплавления сердечника из диоксида урана имитатора типа БН в условиях экспериментов с прекращением расхода при разной величине линейной мощности: — - расчетный радиус зоны расплавления; ◆ - измеренные после экспериментов радиусы центральной полости

ются на рис. 5. Во всех случаях экспериментальные размеры превышают расчетные, что можно объяснить, по-видимому, выделением тепла в топливном сердечнике за счет дополнительного протекания электрического тока в самом сердечнике.

На стенде были проведены опыты по разрушению имитаторов твэлов типа АСТ, РБМК при прекращении расхода газа (гелия) [17]. В качестве материала таблеток в сердечнике использовалась легкоплавкая керамика на основе Al_2O_3 , оболочка из циркониевого сплава диаметром 13,6х0,94 мм, нагреватель из графита диаметром около 6,5 мм. Для эксперимента, проведенного при линейной нагрузке 20,5 кВт/м, наибольшее отличие расчетных значений температуры и измеренных термopарами до выхода их из строя (рис. 6а) составляет 40%. Максимальная температура поверхности (рис. 6б), зарегистрированная пирометром, равнялась 1650°C. Расчетная максимальная температура в середине имитатора равна 1550°C, что на 6% ниже измеренной. Характерно, что расчетные и экспериментальные величины значительно ниже температуры плавления циркониевой оболочки. Однако произошло практически полное разрушение имитатора. Через 31,3 с после прекращения расхода произошел первый выброс расплавленной массы несколько ниже середины имитатора. В то же время с противоположной стороны оболочка не была разрушена. Примерно в момент 42 с имел место новый интенсивный выброс. Процесс разрушения оболочки продолжался около 27 с. Расчетная температура во внутренних слоях сердечника достигает точки плавления первоначально в нижней части (рис. 6г) - на участке $z = 2,5-5$ см во время 43,4-50,5 с, что на 12-19 с позднее вышеприведенного времени первого выброса. Ко времени 90 с диаметр расплавленной области в сердечнике (рис. 6д) составит 7,8-8,1 мм. Таким образом, расчеты указывают на наличие расплавленной области в сердечнике. Выброс расплава под давлением из центральных слоев и проплавление оболочки расплавленной массой, температура которой выше точки плавления оболочки (температуры плавления материалов сердечника и оболочки почти равны), - вероятный механизм разрушения оболочки. Более раннее время начала разрушения имитатора по сравнению с расчетным временем начала плавления сердечника можно объяснить локально высокой энергонапряженностью либо возможным эвтектическим взаимодействием материалов сердечника и оболочки при температуре ниже обоих значений температуры их плавления (которое имеет место для

ной полости в таблетках (рис.5). Имеющее место в эксперименте последующее перегорание нагревателя в нижней части можно объяснить вытеканием расплава диоксида урана через некоторое время после плавления и, в результате этого, увеличением зазора вокруг нагревателя, что вызывает ухудшение теплоотвода и перегрев нагревателя.

Расчетные и экспериментальные значения радиусов зоны расплавления и центральной полости соответственно в ряде экспериментов с имитаторами, имеющими зазор под оболочкой 0,1 мм, сопоставля-

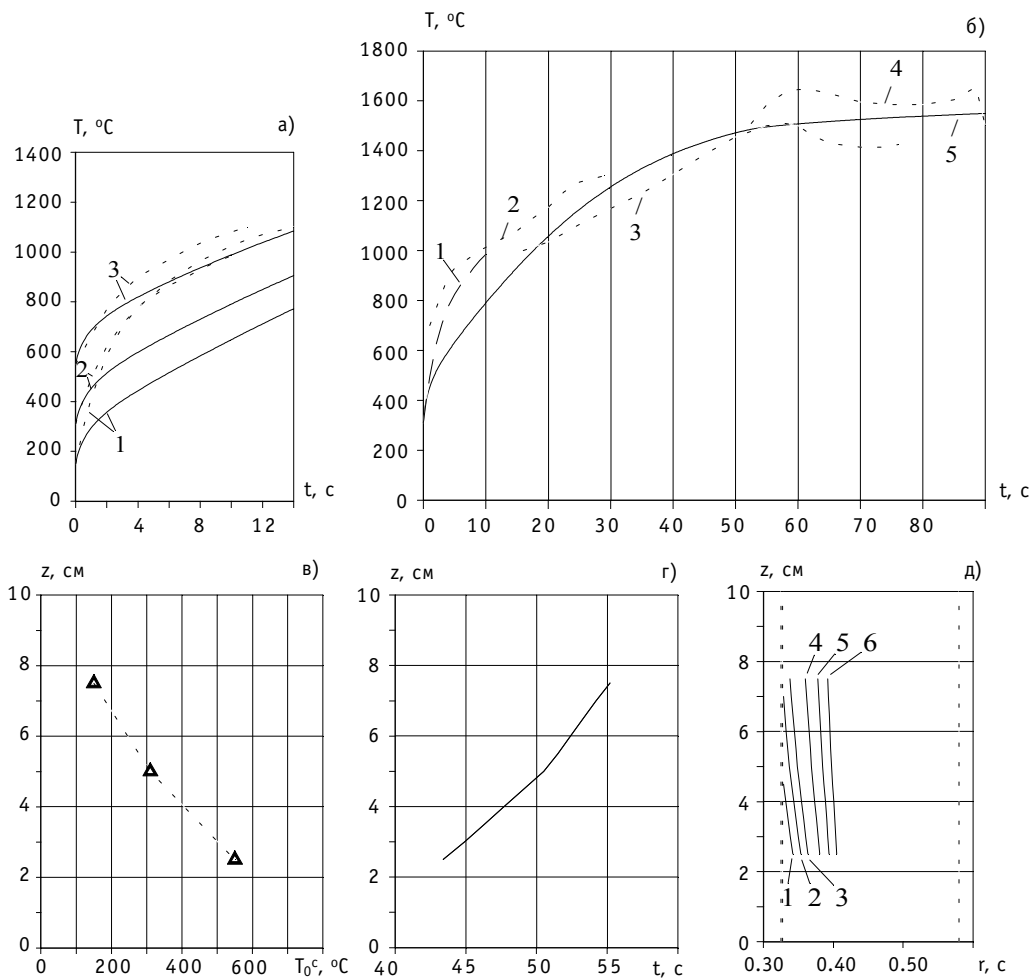


Рис. 6. Моделирование плавления имитатора твэла типа АСТ с сердечником из окиси алюминия в условиях эксперимента с прекращением расхода при мощности электронагрева 20,5 кВт/м: а) температура наружной поверхности имитатора в диапазоне измерения термопарами: 1, 2, 3 - значения в точках измерения верхней, средней и нижней термопарами соответственно; пунктирные линии - данные измерений; сплошные линии - расчетные значения; б) температура наружной поверхности в средней части имитатора: 1, 2, 3, 4 - значения, измеренные средней термопарой и пирометрами в диапазонах 600-1300, 1000-1600, 1500-2200 $^{\circ}\text{C}$ соответственно; 5 - расчетные значения; в) начальные значения температуры поверхности имитатора в эксперименте; г) расчетное время начала плавления сердечника; д) расчетные положения границы раздела фаз: 1, 2, 3, 4, 5, 6 - $t = 50, 55, 60, 70, 80, 90 \text{ с}$

пары диоксид урана - цирконий [18]).

Таким образом, в результате расчетного анализа экспериментов по разрушению имитаторов твэлов получено, что механизм разрушения оболочки твэла в условиях аварии с прекращением теплоотвода от твэлов и/или медленным повышением мощности обуславливается наряду с другими факторами последовательностью плавления топливного сердечника и оболочки. В том случае, если сердечник начинает плавиться прежде оболочки, механизмом разрушения оболочки твэла (со свежим топливом) в указанных условиях является проплавление оболочки расплавом топлива, переместившимся из внутренних слоев сердечника (либо растворение оболочки в случае эвтектического взаимодействия). Полученные данные относительно механизмов разрушения и факторов, их обуславливающих, согласуются с имеющимися в литературе данными экспериментов, аналогичных рас-

смаатриваемым в данной работе [6, 7]. Результаты расчетов динамики теплообмена и плавления в имитаторах твэл разного типа в целом удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным качественно и по основным количественным параметрам.

Литература

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89 // Атомная энергия. - 1990. - Т. 69. - Вып. 6. - С. 409-422.
2. Модельное изучение процессов, возникающих при перегреве твэлов / Г.Б. Усынин, Ю.И. Аношкин, Г.Н. Власичев и др. // Атомная энергия. - 1986. - Т. 61. - Вып. 5. - С. 347-350.
3. Экспериментальное изучение процессов плавления твэлов на электрообогреваемых имитаторах / Г.Б. Усынин, Ю.И. Аношкин, Ю.Н. Галицких, М.А. Семенычев, Г.Н. Власичев // Вопросы атомной науки и техники. Сер. физ. и техн. яд. реакторов. - 1988. - Вып. 5. - С. 9-12.
4. Alexas A. On the Simulation of Fast Breeder Reactor Pin Behavior Using UO_2 Pins with Direct Electrical Heating // Nuclear Technology. - 1977. - Vol. 36. - P.129-138.
5. Галактионов В.В., Езерский А.П. Анализ процесса плавления с учетом свободной конвекции // ИФЖ. - 1983. - Т. 44. - № 4. - С. 689.
6. The Application of the TRAFIC Code to Fast Reactor Fuel Transient / J.R. Matthews, R.F. Cameron, P.E. Coleman, R. Thetford. - Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. int. conf. (Guernsey, 12-16 May 1986). - BNES, London, 1987. - Vol. 2. - P.469-474.
7. Асмолов В.Г. Результаты исследований тяжелых аварий водоохлаждаемых реакторов // Атомная энергия. - 1994. - Т. 76. - Вып. 4. - С.282-302.
8. In-core Fuel Disruption Experiments Simulating LOF Accidents for Homogeneous and Heterogeneous Core LMFBRs: FD2/4 Series / S.A. Wright, P.K. Mast, G. Schumacher, E.A. Fischer. - Proc. of the LMFBR Safety Topical Meeting (Lyons, 19-23 July 1982). - Vol. 2. - P.123-132.
9. Chanming Yu, Xiaojing Yin. A Method for Treating Thermophysical Properties in the Heat Conduction Equation with Phase Change // Thermophys. Prop.: Proc. Ist Asian Thermophys. Conf. (Beijing, Apr. 21-24, 1986). - Beijing, 1986. - P.299-303.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 599 с.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. - М.: Атомиздат, 1979. - 416 с.
12. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача: Учеб. для неэнергетических спец. вузов. - М.: Высшая школа, 1988. - 479 с.
13. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. - М.: Атомиздат, 1968. - 484 с.
14. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов. - Л.: Энергия, 1973. - 336 с.
15. Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И., Семенычев М.А. Исследование плавления твэлов на имитаторах с топливными композициями // Атомная энергия. - 1991. - Т. 70. - Вып. 2. - С.108-110.
16. Финк Дж., Часанов М., Лейбовиц Л. Теплофизические свойства двуокиси урана // Атомная техника за рубежом. - 1982. - № 11. - С.20-25.
17. Исследования аварийного перегрева топливных элементов ядерных реакторов на электрообогреваемых имитаторах / Г.Н. Власичев, А.В. Котин, М.А. Семенычев, Г.Б. Усынин // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1998. - № 4. - С. 53-57.
18. Основные экспериментальные результаты испытательной программы CORA / П. Хофман, З. Хаген, В. Ноак и др. // Атомная техника за рубежом. - 1995. - № 4. - С.12-20.

Поступила в редакцию 02.10.2000

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.564:53.082.4

Automatic Control System of Stressed State of a Metal for Technological Channels at Steel-zirconium Adapter of RBMK-type Nuclear Reactors \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, A.A. Zilper; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 7 illustrations, 9 tables.-References, 9 titles.

The results of development system for measuring of changes of stressed metal construction states have been shown in this article. The system can be used for control of the stressed state of adapters of RBMK-type reactor fuel channels. The changes of stressed state are determined by means of ultrasonic wave velocity changes which are generated in the suffered materials.

УДК 51-72:531.15

Analysis of a Rotor Working Equations with Electromagnetic Bearings \E.V. Gaivoronskaya, S.V. Lebedeva; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 5 pages, 2 illustrations.-References, 3 titles.

The problem of the creation of vertical turbine machine with electromagnetic bearings is considered with reference to high-temperature gas reactor. Simple formulas of the precession frequency and nutation frequency of the shaft are derived on the basis of solutions of the shaft working equations for the special cases depending on a sistem parameters.

УДК 621.039.584

The Calculational Study of the Possibility of Corium Confinement in the Catcher with the Walls Cooled by Impinging Jets \M.V. Kachtcheev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 4 illustrations.-References, 5 titles.

A catcher with the walls cooled by impinging jets has been considered as a device for corium cooling and confinement outside the reactor vessel. The proposed catcher design enables the basic problems of corium confinement and cooling after its release from the reactor vessel to be solved. The calculational study for corium-to-catcher shell interaction using the PPRKRS code has been performed. It can be applied for the analysis of the possibility of corium confinement in the catcher of any design.

УДК 621.039.526

On Selection of Optimal Composition of the Na-K-Cs-alloy for LMFR Core Cooling \V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 7 pages, 1 illustration.-References, 5 titles.

The Na-K-Cs-alloy may be considered as a potential coolant for the LMFR. In this paper are discussed the selection of the optimal composition of this alloy. This composition may be obtained as the solution of multicriteria optimization problem.

УДК 681.3:621.039.548

The Calculation Analysis of Experiments on Destruction of Electroheated Fuel Element Simulators \G.N. Vlasichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 10 pages, 6 illustrations.-References, 18 titles.

The technique and computer program for account of emergency process of cylindrical fuel elements heating and melting are developed. Calculating analysis of experiments on electrical

heating of fuel rod simulator, made on special heat-physical test facility is carried out. The results of modelling were used for examination of calculation technique of the heat-exchange in fuel rod subject to core and cladding melting.

УДК 51-72:621.039.73

Efficiency of Fission Products Transmutation \Yu.A. Kazansky, D.A.Klinov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 9 pages, 2 illustrations, 2 tables.-References, 4 titles.

The transmutation efficiency of dangerous fission products has been considered. Mathematical model and calculation results are presented. It is shown that there is not profit in radioactivity level on the Earth from transmutation if Nuclear Power under operating.

УДК 51-72:539.172.12

Application of NRT-formula for Calculation of Displacement Cross-sections for Materials Irradiated by Nucleons of Intermediate and High Energy \A.Yu. Konobeyev, Yu.V. Konobeev, Yu.A. Korovin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 5 illustrations.-References, 9 titles.

The behavior of cascade function for calculation of radiation damage in materials has been investigated at high energy of incident ions. The calculation of displacement cross-sections has been carried out for the number of materials with atomic number $Z=13-28$, irradiated by protons with the energy up to 25 GeV. It is shown that the displacement cross-section can be obtained within 5-20% error with the help of NRT-formula.

УДК 51-72:621.039.516.4

Results of the Simulation of Parameters of the Fuel Cycle for the WWER-1000 Reactor with $(m\%Th^{232}, n\%U^{235}, k\%Pu^{239})O_2$ Fuel Compositions \I.V. Shamanin, A.A. Ukhov, H.-J.Ruetten, K.Haas, W.Sherer; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 12 pages, 4 illustrations, 12 tables.-References, 3 titles.

General parameters of the WWER Reactor using $(m\%Th^{232}, n\%U^{235}, k\%Pu^{239})O_2$ fuel are analyzed. In all considered variations it was assumed that the construction of the active core and the fuel element assemblies are standard as for WWER-1000 reactor. Operation periods of 3, 4 and 5 burnup cycles were examined.

The aim of this study was to investigate the ability of the WWER-1000 as a potential nuclear power installation for the utilization of weapon grade plutonium in thorium-based fuel.

УДК 621.311:621.039.004.7

Decommissioning of the First NPP \G.S.Kotikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 5 pages, 1 tables.-References, 3 titles.

The materials about life cycle of the First NPP (Obninsk), with channel reactor are given in this paper. Now station exhaust the resource and in the near future its decommissioning will be made. On the basis of the decision of Government in the First NPP building should the Russian museum of atomic engineering organized.

УДК 621.039.83:539.1:047

Short-lived Radionuclides in Experimental Nuclear Medicine and Biological Studies \G.A. Petrova, V.M. Petriev, V.G. Skvortsov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 3 illustrations, 2 tables.-References, 6 titles.