

P13-2010-58

Ким Тхэ Гюн, Ю. Н. Пепельшев, А. Д. Рогов

МЕТОДИКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ТВЭЛА РЕАКТОРА **ИБР-2**

Ким Тхэ Гюн, Пепельшев Ю. Н., Рогов А. Д. P13-2010-58
Методика теплофизического анализа твэла реактора ИБР-2

Рассмотрена задача нестационарного распределения температуры в теплоделяющем элементе (твэле) реактора ИБР-2: в топливе (в таблетках втулочного типа с отверстием и в брикетах без отверстия), в оболочке твэла, а также в окружающем оболочку слое движущегося натрия. Для проведения термодинамического анализа твэла создана программа численного решения уравнений теплопроводности в цилиндрической системе координат с помощью разностных уравнений одномерной нестационарной задачи теплопроводности. Программа построена на основе алгоритмов, использованных в программах FEMAXI, FRAPTRAN и FRAPCON, но имеет существенное от них отличие, поскольку ориентирована на теплофизику быстрых реакторов типа ИБР-2 с плутониевым топливом и натриевым охлаждением с возможностью исследования быстропротекающих тепловых процессов вплоть до микросекундной длительности. Приведено краткое описание использованных в программе алгоритмов решения нестационарных тепловых процессов, методика их программной реализации.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Kim Tae Gyoun, Pelyolshev Yu. N., Rogov A. D. P13-2010-58
Thermal Analysis Methods of a Fuel Rod in IBR-2 Pulsed Reactor

The problem of transient temperature distribution in a fuel rod of the reactor IBR-2 is considered: in fuel (in rod-shaped pellet and in hollow-shaped pellet), in cladding of the fuel rod, and also in liquid sodium coolant surrounding a fuel rod. For analyzing transient thermal behaviour of a fuel rod, a program for numerical solving of heat conduction equation in cylindrical coordinates system by applying finite difference method to the equations of one-dimensional transient problem of heat conduction is created. The program is written on the basis of the algorithms used in programs FEMAXI, FRAPTRAN and FRAPCON, but has essential difference from them as it is focused on thermal physics of fast reactors of IBR-2 type with plutonium fuel and sodium coolant with research possibility of very rapid thermal processes up to microsecond duration. The solution algorithms of transient thermal behaviour used in the program and their implementation technique are shortly described.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Анализ распределений температур в тепловыделяющем элементе (ТВэле) импульсного реактора ИБР-2 является чрезвычайно важной задачей для обоснования безопасной и надежной работы реактора. Особенно это важно для последующей оценки температурных проявлений в изгибных деформациях ТВэла, влияющих на динамику быстрой обратной связи и, соответственно, на стабильность работы реактора. Поэтому расчетная оценка распределений температур в активной зоне ИБР-2 является необходимой основой для проведения в дальнейшем термомеханического анализа ТВэла и динамики быстрой обратной связи.

Для расчета распределений температур в активной зоне ИБР-2 с учетом современных данных о теплофизических константах материалов активной зоны и современных представлений о моделях расчета была разработана методика и создана программа численного решения уравнений теплопроводности. Использовались разностные уравнения одномерной нестационарной задачи решения теплопроводности в цилиндрической системе координат. Программа построена на основе алгоритмов, используемых в программах FEMAXI, FRAPTRAN и FRAPCON [1–7] для расчета тепловых реакторов, но имеет существенное отличие. Основное отличие состоит в том, что данная программа ориентирована на теплофизику быстрых реакторов типа ИБР-2 с топливом в виде диоксида плутония и натриевым охлаждением. Кроме того, программа позволяет исследовать теплофизику ТВэла не только быстрых реакторов с непрерывным выделением мощности, но и термодинамику импульсных реакторов и импульсных подкритических сборок с быстропротекающими процессами энерговыделения вплоть до нескольких микросекунд. С помощью данной программы можно моделировать различные аварийные ситуации, такие как потеря теплоносителя, генерирование аварийного импульса мощности и т. д.

В работе представлены основные положения методики решения нестационарного распределения температур в ТВэле ИБР-2: в топливе, в оболочке ТВэла, а также в слое движущегося вблизи ТВэла натрия. Кратко дано описание алгоритмов и их программной реализации, и в качестве примера приведены некоторые результаты анализа ТВэла ИБР-2.

1. МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА ТВЭЛА

Геометрическая конфигурация твэла ИБР-2 показана на рис. 1. Топливом служат таблетки из спеченной двуокиси плутония, которые могут быть втулочного типа (с отверстием в центре) или брикетного (сплошные). Таблетки помещены в оболочку из нержавеющей стали и сверху через пластину поджаты пружиной.

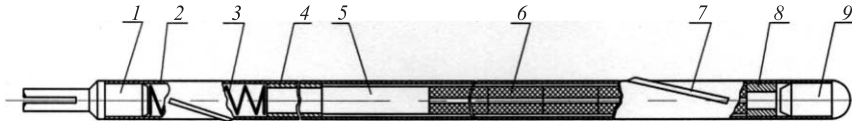


Рис. 1. Тепловыделяющий элемент реактора ИБР-2: 1 — наконечник верхний; 2 — оболочка; 3 — пружина; 4 — вставка; 5 — отражатель; 6 — таблетки активной части; 7 — проволока; 8 — втулка; 9 — заглушка

Расчет температурного поля в твэле ИБР-2, как и в любом теле, сводится к решению уравнения теплопроводности в заданных граничных условиях. Для решения задачи теплопроводности в твэле за приемлемый расчетный период времени использовался метод конечных разностей. Суть данного метода состоит в том, что в дифференциальном уравнении теплопроводности все бесконечно малые разности (дифференциалы) заменяются конечными, но малыми величинами. Следовательно, истинное непрерывное в пространстве и времени распределение температуры заменяется приближенными прерывистыми значениями, усредняющими температуру в конечных малых участках тела Δx , Δy , Δz и малых промежутков времени $\Delta \tau$. Достоинством метода является возможность решать задачи для тел сложной формы.

Для численного решения методом конечных разностей твэл по оси разделяется на ряд сегментов (участков) (см. рис. 2). Каждый сегмент, в свою очередь, разделяется в радиальном направлении на ряд круговых элементов. Число сегментов в твэле может выбираться произвольно, но обычно определяется высотой топливной таблетки и для ИБР-2 равно 22 или 44. Число круговых элементов в каждом сегменте выбирается следующим образом: в топливе — 10, в зазоре — 1 и в оболочке твэла — 3.

Основные положения процедуры вычисления состояли в следующем.

- Температура теплоносителя для всех сегментов зависит от распределения энтальпии теплоносителя в предыдущем временном шаге и определяется температурой, давлением и скоростью на входе, а также значением поверхностного теплового потока от каждого сегмента в текущем временном шаге.
- Энтальпия каждого осевого сегмента вычисляется на основе распределения энтальпии в конце предыдущего временного шага с учетом энтальпии

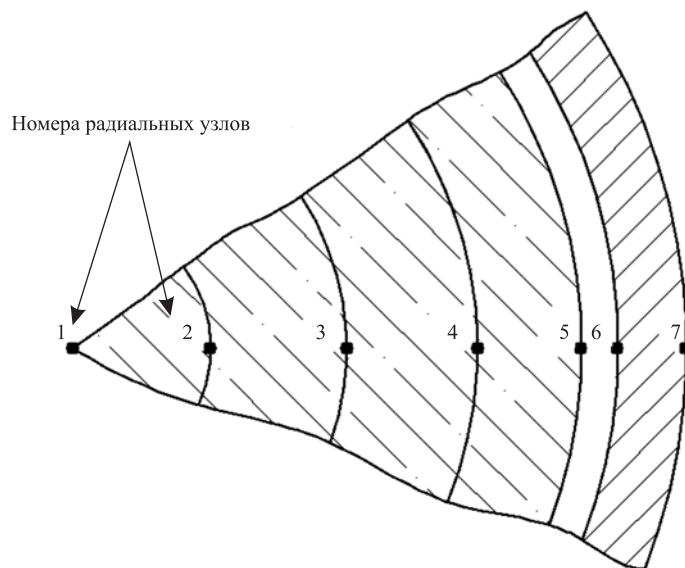
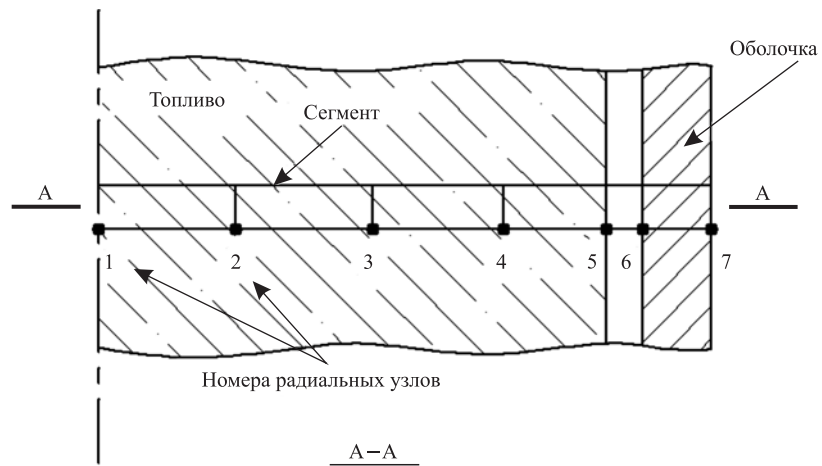


Рис. 2. Пример разделения твэла на сегменты по вертикали и на круговые элементы по радиусу. Точками отмечены узлы, в которых оценивается температура. Общее число сегментов на рисунке, равное семи, взято исключительно для иллюстрации

теплоносителя на входе сегмента. Увеличение энтальпии вычисляется с учетом скорости течения и количества тепла от каждого сегмента. Распределение температуры теплоносителя в осевом направлении определяется, таким образом, распределением энтальпии теплоносителя.

- Затем, используя известную температуру теплоносителя, можно определить коэффициент теплопередачи и вычислить температуру на внешней оболочке твэла.

- Температурное распределение от поверхности оболочки до центра топливной таблетки вычисляется в радиальной одномерной цилиндрической системе.

- Теплопередача в осевом направлении сегмента не учитывается, поскольку температурные градиенты по радиусу твэла на порядок выше, чем по высоте.

1.1. Модель роста энтальпии для теплоносителя. В этой модели расход и давление теплоносителя на каждом временном шаге не изменяются. Энтальпия теплоносителя $H(z, t)$ для точки по оси z в момент времени t может быть задана интегралом по пути и выражается следующим образом [2]:

$$H(z, t) = H(0, t_{\text{in}}) + \int_{t_{\text{in}}}^{\tau} \frac{V(z')Q(z')}{S(z')} d\tau, \quad (1)$$

где $H(z, t)$ — энтальпия теплоносителя [Дж/кг]; $H(0, t_{\text{in}})$ — энтальпия теплоносителя на входе в момент времени t_{in} [Дж/кг]; t_{in} — время, когда теплоноситель находится в точке z в момент времени t на входе в активную зону [с]; $z'(\tau)$ — точка по оси z для теплоносителя в момент времени τ , который находился в точке z в момент времени t [м]; V — удельный объем [м³/кг]; Q — линейная плотность мощности [Вт/м]; S — проходное сечение [м²].

1.2. Коэффициент теплопередачи теплоносителя. Для вычисления коэффициента теплопередачи при вынужденной конвекции для однофазного состояния теплоносителя используется следующее соотношение [1–3, 5, 6]:

$$h = 0,023 \frac{k}{D_e} \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4}, \quad (2)$$

где h — коэффициент теплопередачи [Вт/м² · К]; D_e — эквивалентный тепловой гидравлический диаметр [м]; k — теплопроводность теплоносителя [Вт/м · К]; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля.

Эквивалентный тепловой гидравлический диаметр D_e выражается в виде $D_e = 4S/P$ [1–4], где S — площадь поперечного сечения канала теплоносителя (см. заштрихованную область на рис. 3) и P — смоченный периметр твэла.

Обозначив расстояние между центрами твэлов буквой l , внешний радиус твэла буквой r и радиус дистанционирующей проволоки буквой r_w , смоченный периметр и площадь поперечного сечения канала теплоносителя можно выразить следующим образом:

$$P = 2\pi r + 2\pi r_w, \quad S = \frac{\sqrt{3}}{2} l^2 - \pi r^2 - \pi r_w^2.$$

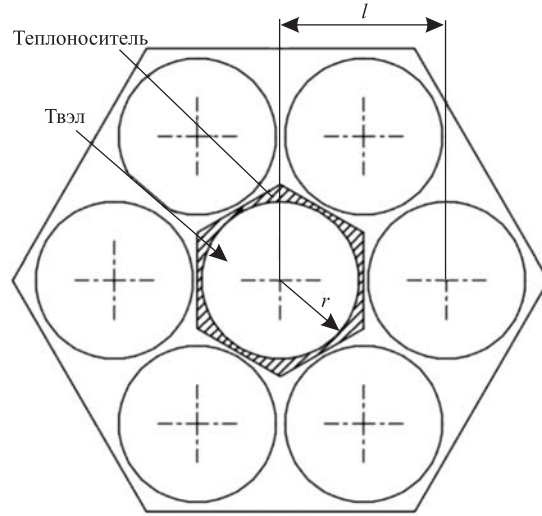


Рис. 3. Модель канала теплоносителя, охлаждающего центральный твэл в тепловыделяющей сборке ИБР-2

1.3. Модель для вычисления температур. При анализе температурного градиента по радиусу в каждом осевом сегменте используются одномерные уравнения теплопроводности. Предполагается, что тепловые свойства топлива в кольцевом элементе зависят от температуры. Основываясь на этих предположениях, уравнение теплопроводности на одном осевом сегменте можно представить следующим образом [1, 2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C_v(T, r)T(r, t)] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k(T, r) r \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right) + q(r, t), \quad (3)$$

где T — температура [К]; t — время [с]; r — координата в радиальном направлении [м]; C_v — объемная удельная теплоемкость [Дж/м³]; k — теплопроводность [Вт/м · К]; q — энерговыделение [Вт/м³].

Граничные условия следующие:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (4)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_0} = h(T_w - T_b), \quad (5)$$

где r_0 — внешний радиус твэла; T_w — температура на поверхности внешней оболочки и T_b — температура теплоносителя.

1.4. Распределение тепловыделения. Зависимость распределения тепловыделения по радиусу определяется по следующей формуле [2, 3]:

$$Q_1(R) = I_0(kR) + \frac{I_1(kR_1)}{K_1(kR_1)} K_0(kR). \quad (6)$$

Здесь Q_1 — распределение тепловыделения относительно максимального значения; I — функция Бесселя первого рода; R_1 — радиус отверстия в центре таблетки; K — функция Бесселя второго рода; R — радиальная координата в таблетке; k — обратная величина длины диффузии нейтрона [см^{-1}]. Значение k вычисляется из уравнения

$$k = 0,328(ED)^{0,8} + 0,54 \left(\frac{0,5}{R_p} \right)^{0,82} (ED)^{0,19}, \quad (7)$$

где E — обогащение ^{239}Pu [%]; D — доля от теоретической плотности таблетки; R_p — радиус таблетки [см].

Ввиду малого радиуса твэла (в миллиметрах), меньшего характерных длин миграции нейтронов в активной зоне ИБР-2, можно в первом приближении принять профиль энерговыделения по радиусу твэла равномерным. Плотность энерговыделения по высоте твэла в начале кампании ИБР-2 определялась экспериментально [8], далее — расчетным путем.

1.5. Модель теплопроводности в зазоре. Теплопроводность в зазоре между топливом и оболочкой определяется суммой проводимости через излучение (h_{rad}), теплопередачи через газ в зазоре (h_{gas}) и теплопроводности через точки контакта твердых тел (h_{solid}) [1, 2, 4, 6, 7]:

$$h = h_{\text{rad}} + h_{\text{gas}} + h_{\text{solid}}. \quad (8)$$

Существуют различные модели для вычисления теплопроводности в зазоре. Мы используем измененную модель Росса–Строте, выраженную следующим образом:

$$h = \frac{\lambda_{\text{gas}}}{C(R_{\text{ef}} + R_2) + (g_1 + g_2) + GAP} + \frac{\lambda_m P_c}{0,5R^{1/2}H} + h_{\text{rad}}. \quad (9)$$

Первый член уравнения (9) — газовый компонент проводимости, второй — проводимость твердого контакта и третий — проводимость через излучение. Параметр $C = 2,77 - 2,55 \cdot 10^{-8} P_c$, а λ_m и h_{rad} — довольно громоздкие выражения от большого количества переменных, задающих геометрию и теплофизические параметры зазора, таких как давление контакта оболочка–таблетка, видимая шероховатость поверхности таблетки и т. д. Ввиду громоздкости этих выражений здесь они не приводятся, но подробно изложены в литературе [1, 2].

Теплопроводность газовой смеси по модели MATPRO из библиотеки «A Library of Materials Properties for Light Water Reactor Accident Analysis» [9] можно представить следующим образом:

$$\lambda_{\text{gas}} = \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i / \left(1 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n \phi_{ij} \frac{x_j}{x_i} \right) \right], \quad (10)$$

$$\phi_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2}{2^{3/2} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{\frac{1}{2}}} \left[1 + \frac{2,41(M_i - M_j)(M_i - 0,142M_j)}{(M_i + M_j)^2} \right], \quad (11)$$

где x_i — молярное отношение газа i ; λ_i — теплопроводность газа i [Вт/см · К]; M_i — молярная масса газа i и $(g_1 + g_2)$ — длина скачков температуры между твердой фазой и газовой фазой [см].

Суммарное расстояние скачков температур по высоте твэла вблизи границ перехода от топлива к газу и от газа к внутренней оболочке твэла $(g_1 + g_2)$ для n газов задается в виде

$$g_1 + g_2 = \sum_{i=1}^n x_i (g_1 + g_2)_i \frac{10^5}{P_{\text{gas}}}, \quad (12)$$

где P_{gas} — давление газа [Па]. Согласно модели Росса, значения $(g_1 + g_2)$ для гелия, азота, криптона и ксенона — $10 \cdot 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-4}$ [см].

1.6. Модель температуры газа в газовом промежутке. Газовый промежуток в верхней части твэла практически не влияет на распределение температур в топливе, но может влиять на термомеханические параметры твэла (изгибы, смещения, напряжения и т. д.), поэтому в теплофизической модели твэла ИБР-2 газовый промежуток учтен достаточно корректно. Модель для расчета температуры газа в газовом промежутке твэла основана на трех предположениях:

- температура верхней поверхности таблетки не зависит от температуры газа;
- газ хорошо перемешивается естественной конвекцией;
- осевые температурные градиенты в пружине и оболочке твэла незначительны.

Тепловая модель газа в газовом промежутке позволяет вычислить обмен энергии между газом и структурными компонентами твэла, такими как поддерживающая пружина, верхняя таблетка с пластиной и оболочка.

Обмен энергии между газом и структурными компонентами происходит путем естественной конвекции, проводимости и излучения [1]. Пружина смоделирована двумя узлами равной массы (узел центра и поверхностный узел).

Оболочка смоделирована тремя узлами (два узла поверхности и один узел центра). Массой узла центра является двойная масса поверхностных узлов. Эта схема приводит к шести уравнениям передачи энергии, из которых могут быть вычислены температуры газового промежутка. Уравнения для передачи энергии для газа, пружины и оболочки имеют следующий вид.

Газ:

$$\rho_g V_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = A_{ep} h_{ep} (T_{ep} - T_g) + A_{cl} h_{cl} (T_{cli} - T_g) + A_{ss} h_{ss} (T_{ss} - T_g); \quad (13)$$

узел центра пружины:

$$\rho_s V_{sc} C_s \frac{\partial T_{sc}}{\partial t} = \bar{q} V_{sc} + \frac{A_{sc} \lambda_s (T_{ss} - T_{sc})}{R_{ss}}; \quad (14)$$

узел поверхности пружины:

$$\begin{aligned} \rho_s V_{ss} C_s \frac{\partial T_{ss}}{\partial t} = \bar{q} V_{ss} + A_{sc} \lambda_s (T_{sc} - T_{ss}) + A_{ss} h_{rads} (T_{cli} - T_{ss}) + \\ + h_{ss} (T_g - T_{ss}) + A_{ss} h_{cons} (T_{cli} - T_{ss}); \end{aligned} \quad (15)$$

внутренний узел оболочки:

$$\begin{aligned} \rho_{cl} V_{cli} C_{cl} \frac{\partial T_{cli}}{\partial t} = A_{cl} h_{radc} (T_{ss} - T_{cli}) + A_{cl} h_{cl} (T_g - T_{cli}) + \\ + A_{cl} h_{conc} (T_{ss} - T_{cli}) + \frac{A_{cl} \lambda_{cl}}{\Delta r / 2} (T_{clc} - T_{cli}) + \bar{q} V_{cli}; \end{aligned} \quad (16)$$

узел центра оболочки:

$$\rho_{cl} V_{clc} C_{cl} \frac{\partial T_{clc}}{\partial t} = \bar{q} V_{clc} + \frac{A_{cl} \lambda_{cl}}{\Delta r / 2} (T_{cli} - T_{clc}) + \frac{A_{cl} \lambda_{cl}}{\Delta r / 2} (T_{clo} - T_{clc}); \quad (17)$$

поверхностный узел оболочки:

$$T_{clo} = T_{cool}. \quad (18)$$

Обозначения даны в таблице. Обмен энергии при естественной конвекции происходит между газом и верхней поверхностью таблетки, пружиной и оболочкой. Коэффициенты теплопередачи моделируют этот обмен энергией.

Для вычисления коэффициентов теплопередачи использовались следующие допущения: верх топлива является плоской пластиной, пружина — горизонтальным цилиндром, а оболочка твэла — вертикальной поверхностью. Допускается возможность как ламинарной, так и турбулентной естественной конвекции. Коэффициенты для естественной конвекции в плоской пластине для теплопередачи поверхности топливной таблетки взяты из работы [1].

Обозначения, используемые в уравнениях для тепловой модели газового промежутка

Обозначение
A — площадь поверхности
h — коэффициент теплопередачи
\bar{q} — объемное тепловыделение
Δr — толщина оболочки
Нижние индексы
cl — оболочка
cli, clc, clo — внутренний, центральный, внешний узлы пружины
cool — теплоноситель
conp, cons — проводимость
conv — конвективная теплопередача к теплоносителю
ep — конец таблетки
g — газ
p — газовый промежуток
s — пружина
sc, ss — узел центра и поверхности пружины
gads, gadc — теплопередача излучением между пружиной и оболочкой

Для пружины и внутренней поверхности оболочки использовались коэффициенты естественной конвекции, как для горизонтальных цилиндров. Проводимость энергии между пружиной и оболочкой представлена в уравнениях коэффициентами теплопередачи. Для теплопередачи путем естественной конвекции энергия передается газу от пружины и затем от газа до стенки оболочки или наоборот.

Перенос энергии излучением между пружиной и оболочкой включен в модель газового промежутка при помощи соответствующих коэффициентов теплопередачи [1].

В расчетах также учитывался нагрев пружины и оболочки от гамма-излучения. Объемное тепловыделение в указанных элементах твэла в основном определяется гамма-излучением от деления плутония и идет на нагрев пружины и оболочки. Принималось, что около 10 % энергии деления плутония выделяется в виде гамма-излучения.

2. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ТЕПЛООВОГО АНАЛИЗА ТВЭЛА

Программа, реализующая методику теплового анализа твэла быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем типа ИБР-2, создана в Visual C++ 2008.

Дополнительно, для удобства расчетов, была создана библиотека программ, с помощью которой вычисляются теплофизические свойства мате-

риалов твэла и теплоносителя, решаются матричные уравнения, проводится сплайн-интерполяция и т. д.

Программа имеет удобный графический интерфейс пользователя, с помощью которого можно управлять вводом-выводом данных и организацией проведения последовательности расчетов.

Результаты расчетов могут быть представлены в графической форме. Для этого используется OpenGL (открытая библиотека графических функций, многоплатформный программный интерфейс для аппаратных средств компьютерной графики) и Windows GDI (интерфейс графических устройств).

3. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Для примера реализуемости описанной выше методики расчета твэла быстрого реактора на рис. 4–6 приведено стационарное распределение температуры по высоте максимально нагруженного твэла ИБР-2 для двух моделей теплопроводности. Там же показано распределение температур для твэла ИБР-2 с усредненным по активной зоне максимальным значением энерговыделения.

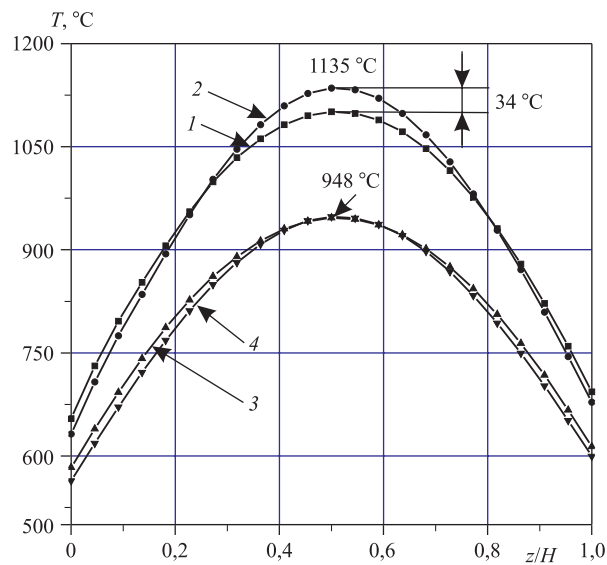


Рис. 4. Распределение температуры (T , °C) в центре топлива в виде брикетов по высоте твэла (z/H , здесь H — суммарная высота топливных таблеток) для моделей теплопроводности MATPRO (1, 3) и ИБР-2 (2, 4) при различной линейной мощности энерговыделения: 1, 2 — в максимально нагруженном твэле $q_t^{\max} = 137,52$ Вт/см; 3, 4 — в твэле со средним по активной зоне максимальным энерговыделением $q_t^{\max} = 109,3$ Вт/см. Средняя мощность — 2 МВт

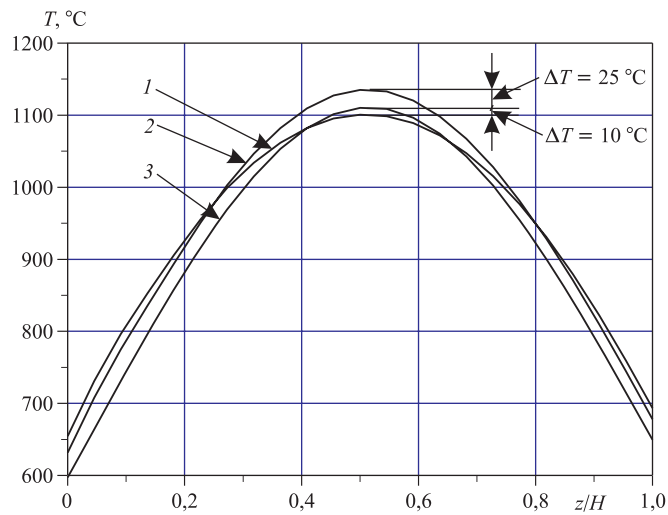


Рис. 5. Сравнение распределения температуры (T , °С) в центре топлива по высоте твэла (z/H , H — суммарная высота топливных таблеток) для моделей теплопроводности МАТРО (1) и ИБР-2 (2) с данными, представленными в работе [9] (3), для максимально нагруженного твэла $q_t^{\max} = 137,52$ Вт/см

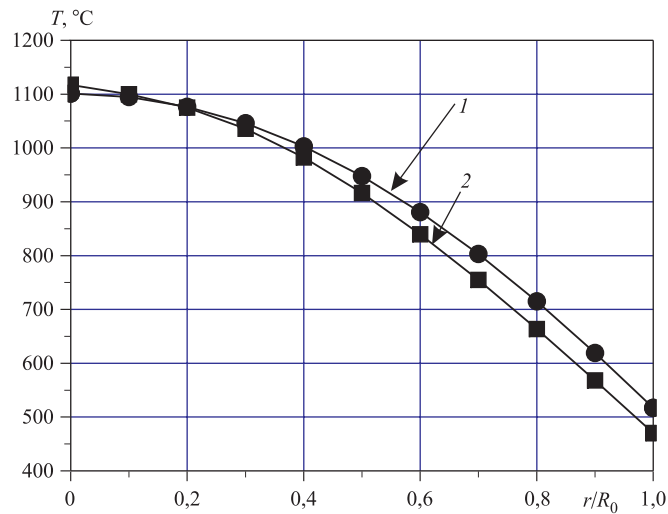


Рис. 6. Сравнение распределения температуры (T , °С) по радиусу топлива (r/R_0) (1) с данными, представленными в работе [9], для максимально нагруженного твэла $q_t^{\max} = 137,52$ Вт/см (2)

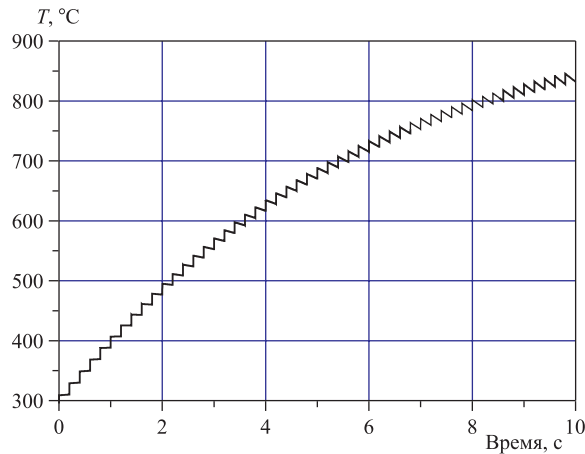


Рис. 7. Процесс подогрева топлива в центре максимально нагруженного твэла ИБР-2 в течение первых десяти секунд от начала развития импульсов мощности. Средняя мощность 2 МВт. Начальная температура топлива соответствует температуре натрия на входе в активную зону

Рис. 7 иллюстрирует возможности программы для расчета температур в импульсе мощности. Представлен характер нагрева топлива в импульсах мощности при мгновенном переходе реактора на среднюю мощность 2 МВт (гипотетический случай выхода на мощность).

Сравнение результатов расчетов с более ранними [9] показало их хорошее совпадение. Основное отличие связано с неопределенностью и расхождением теплофизических данных при высоких температурах для двуокиси плутония. Этот результат важен при анализе аварийных ситуаций на реакторе.

Теплофизические параметры материалов, входящих в состав твэла ИБР-2, представлены в приложении.

ВЫВОДЫ

Разработана методика, и создана программа численного расчета стационарных и нестационарных температурных полей в твэле быстрого реактора типа ИБР-2 с жидкометаллическим теплоносителем и топливом на основе двуокиси плутония.

Сравнение результатов расчетов с более ранними показало их хорошее совпадение. Основное отличие связано с неопределенностью и расхождением теплофизических данных при высоких температурах для двуокиси плутония.

Ввиду важности проводимых исследований работа будет продолжена в направлении расширения программы для решения комплексной задачи нестационарной термомеханики твэла ИБР-2.

ПРИЛОЖЕНИЕ. НЕКОТОРЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ТВЭЛА ИБР-2

I. Теплоноситель (натрий)

1) Плотность

$$\rho = 951,0 - 0,238T \text{ [кг/м}^3\text{]}.$$

2) Коэффициент теплопроводности

$$\lambda = 99,604 - 0,048523T \text{ [Вт/м} \cdot \text{К]}.$$

T — температура [$^{\circ}\text{C}$].

3) Теплоемкость

$$C_p = 1436,74 - 58049T + 4,6229T^2 - 2 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]}.$$

4) Коэффициент динамической вязкости

$$\mu = \rho^{1/3} \cdot 1,2162 \cdot 10^{-5} \exp(0,6976\rho/T) \text{ [Па} \cdot \text{с]}.$$

II. Топливо PuO_2

Для оценки теплофизических параметров топлива использовались две основные модели, взятые из следующих источников. Первый источник — библиотека «A Library of Materials Properties for Light Water Reactor Accident Analysis» [10]. Данные по этой модели отмечены, как по модели MATPRO. Второй источник — данные, применявшиеся ранее для анализа твэла ИБР-2 [11]; в тексте отмечены как модель ИБР-2.

1) Коэффициент теплопроводности

а) Модель MATPRO

В модели MATPRO теплопроводность топлива зависит от температуры, плотности, отношения кислорода к металлу (О/М) и содержания плутония в топливе.

$$\lambda = \left[\frac{D}{1 + (6,5 - 0,00469T')(1 - D)} \right] \left[\frac{C_v}{(A + B'')(1 + 3e_{th})} \right] + \\ + 5,299710^{-3} T e^{[-\frac{13358}{T}]} \left\{ 1 + 0,169 \left[\left(\frac{13358}{T} \right) + 2 \right]^2 \right\},$$

где λ — коэффициент теплопроводности [Вт/м · К]; D — доля от теоретической плотности; C_v — теплоемкость топлива в постоянном объеме [Дж/кг · К]; e_{th} — линейная деформация, вызванная тепловым расширением при температуре > 300 К (безразмерный); T — температура топлива [К]; T' — температура топлива, если $T < 1364$ К. Для $T > 1834$ К коэффициент пористости

$D \{1 + [6,5 - 0,00469 T']\}$ равен 1; и для температур в диапазоне 1364–1834 К коэффициент находится интерполяцией [К]; T'' — температура топлива, если $T < 1800$ К. Для температур $T > 2300$ К T'' равна 2050 К; для температур в диапазоне 1800–2300 К T'' найдена интерполяцией [К]; A — коэффициент, пропорциональный вкладу точечных дефектов в длину свободного пробега фонона [м·с/кг·К]. Соотношение, используемое для этого коэффициента: $0,339 + 12,6 \times$ абсолютная величина $(2,0 - \text{отношение О/М})$; B — коэффициент, пропорциональный вкладу рассеяния фонон–фонон к длине свободного пробега фонона [м·с/кг·К]. Соотношение, используемое для этого коэффициента: $0,06867 \cdot (1 + 0,6238 \times \text{содержание плутония в топливе})$;

$$C_v = \frac{K_1 \theta^2 e^{\left(\frac{\theta}{T}\right)}}{T^2 \left[e^{\left(\frac{\theta}{T}\right)} - 1 \right]^2}.$$

б) Модель ИБР-2

В работе [11] для расчета температур в активной зоне ИБР-2 использовалась температурная зависимость коэффициента теплопроводности диоксида плутония от его пористости:

$$\lambda_a = \lambda_b \left(1 - \alpha \frac{\rho_b - \rho_a}{\rho_a} \right),$$

где λ_a — теплопроводность керамики с плотностью ρ_a ; λ_b — теплопроводность аналогичной керамики с плотностью ρ_b и α — коэффициент, зависящий от структуры пор, температуры и других факторов. Для пористости в пределах 3–10% величина α изменяется незначительно: $\alpha = 2,5$. На рис. 8 для сравнения показаны зависимости коэффициентов теплопроводности в моделях МАТPRO и ИБР-2 от температуры топлива.

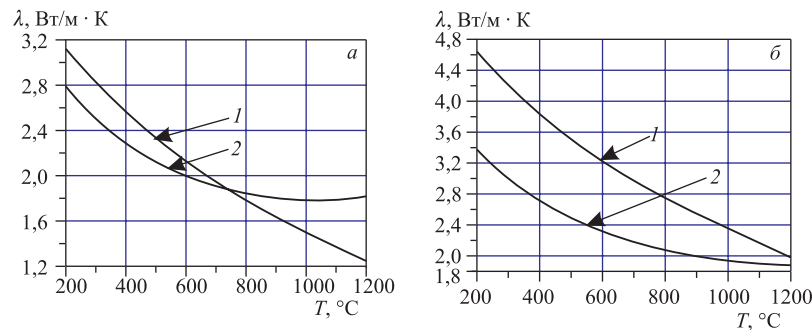


Рис. 8. Зависимость коэффициентов теплопроводности для моделей ИБР-2 (1) и МАТPRO (2) от температуры топлива (от 200 до 1200 °С) при $\rho = 9,49 \text{ г/см}^3$ (слева) и $\rho = 10,06 \text{ г/см}^3$ (справа)

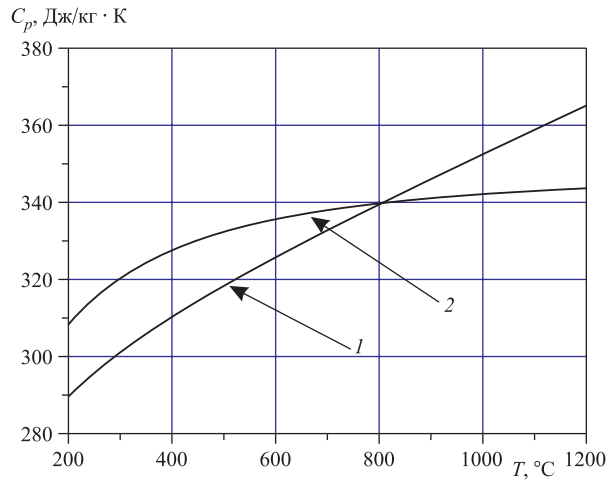


Рис. 9. Зависимость теплоемкостей топлива для моделей ИБР-2 (1) и MATPRO (2) от температуры

2) Удельная теплоемкость топлива

а) Модель MATPRO

$$C_p = \frac{K_1 \theta^2 e^{\left(\frac{\theta}{T}\right)}}{T^2 \left[e^{\left(\frac{\theta}{T}\right)} - 1 \right]^2} + K_2 T + \frac{Y K_3 E_D}{2RT^2} e^{\left(-\frac{E_D}{RT}\right)} \quad [\text{Дж/кг} \cdot \text{К}],$$

где T — температура [К]; Y — отношение кислорода к металлу; R — универсальная газовая константа = 8,3143 [Дж/моль · К]; θ — температура Эйнштейна [К]; K_1 — 347,4 [Дж/кг · К]; K_2 — $3,95 \cdot 10^{-4}$ [Дж/кг · К]; K_3 — $3,860 \cdot 10^7$ [Дж/кг]; Θ — 571,000 [К]; E_D — $1,967 \cdot 10^5$ [Дж/моль].

б) Модель ИБР-2

$$C_p = 278,1 + 0,06026T - 3,801 \cdot 10^6 / T^2 \quad [\text{Дж/кг} \cdot \text{К}].$$

На рис. 9 для сравнения показана зависимость теплоемкостей топлива для моделей MATPRO и ИБР-2 от температуры топлива.

3) Теоретическая плотность

Теоретическая плотность PuO_2 ρ определяется плотностью при комнатной температуре и деформацией тепловых расширений.

$$\rho = \rho_0 (1 - 3 \varepsilon_{\text{PuO}_2}) \quad [\text{кг/м}^3],$$

где ρ_0 — теоретическая плотность при комнатной температуре 11400 [кг/м³]; $\varepsilon_{\text{PuO}_2}$ — линейная деформация теплового расширения, вычисленная для PuO_2

с использованием нулевой деформации при стандартизованной температуре 300 К.

4) Коэффициент излучения теплового излучателя

$$e = 0,7856 + 1,5263 \cdot 10^{-5}T.$$

III. Оболочка твэла

Материал оболочки — нержавеющая сталь. В качестве теплофизической модели оболочки твэла была принята модель из литературы [2–4, 10].

1) Коэффициент теплопроводности

$$\lambda = 0,1065 + 1,326 \cdot 10^{-4}T \text{ [Вт/см} \cdot \text{К]}, \quad T \leq 848 \text{ К.}$$

2) Удельная теплоемкость

$$C_p = 326 + 0,298T - 9,56 \cdot 10^{-5}T^2 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]}, \quad 300 \leq T \leq 1558 \text{ К;}$$

$$C_p = 558,228 \text{ [Дж/кг} \cdot \text{К]}, \quad T \geq 1558 \text{ К.}$$

3) Коэффициент теплового расширения

$$\alpha_{th} = 1,629 \cdot 10^{-5} + 3,285 \cdot 10^{-9}T - 2,198 \cdot 10^{-12}T^2 + 1,629 \cdot 10^{-15}T^3,$$

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha_{th} \Delta T,$$

где α_{th} — коэффициент теплового расширения [1/К]; $\Delta L/L_0$ — линейная безразмерная деформация, вызванная тепловым расширением (равна нулю при 300 К).

4) Плотность

$$\rho = 7900 \text{ [кг/м}^3\text{]}.$$

5) Коэффициент излучения теплового излучателя

$$e = 0,54.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Cunningham M. E., Beyer C. E., Medvedev P. G.* FRAPTRAN: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods. NUREG/CR-6739 (V. 1). PNNL-13576. 2001.
2. *Suzuki M., Saitou H.* Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6 (Ver. 1). JAEA-Data/Code 2005-003. 2006.
3. *Suzuki M.* Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030. 2000.

4. *Berna G.A., Beyer C.E.* FRAPCON-3: A Computer Code for the Calculation of Steady-State, Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burnup. NUREG/CR-6534 (V. 2). PNNL-11513. 1997.
5. *Suzuki M., Saitou H.* Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-IV (Ver. 2). JAERI-Data/Code 97-043. 1997.
6. *Sigeru M., Saitou H.* FEMAXI-III: A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods. JAERI-1298. 1985.
7. *Lanning D.D., Beyer C.E., Painter C.L.* FRAPCON-3: Modifications to Fuel Rod Material Properties and Performance Models for High-Burnup Application. NUREG/CR-6534 (V. 1). PNNL-1151. 1997.
8. *Пепельшев Ю. Н., Бабаев А. И., Гудовский В., Мелихов В. В., Шабалин Е. П.* Физический пуск реактора ИБР-2. Распределение плотности деления в активной зоне. Сообщение ОИЯИ РЗ-12051. Дубна, 1979.
9. Сборка тепловыделяющая и элемент тепловыделяющий реактора ИБР-2. ИНБ № Ибр-2/2739. 1994.
10. *Allison C.M., Berna G.A.* SCDAP/RELAP5/MOD3.1 Code Manual Volume IV: MATPRO — A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis. NUREG/CR-6150 EGG-2720 (V. 4). 2001.
11. Investigation of Plutonium Dioxide Fuel Elements: Experiments and Modeling (Properties of Fuel for the IBR-2 Reactor Fuel Rods). BNL-JINR Contract No. 5608. 1999.

Получено 17 мая 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 29.07.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,49. Тираж 305 экз. Заказ № 57055.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/