

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТВЭЛА В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ

В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов

*ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им.
В.И.Ленина»*

153003, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34



На АЭС России широко используются реакторы ВВЭР. Их активная зона образована тепловыделяющими сборками, состоящими из стержневых твэлов. Топливом в твэлах является двуокись урана. Для обеспечения безопасности эксплуатации реактора введены строгие ограничения по максимальной температуре ядерного топлива. При расчете температурных полей внутри активной зоны реактора необходимо решать сопряженные задачи по определению внутреннего энерговыделения в твэле на основе нейтронно-физических характеристик. Специализированное программное обеспечение для проведения таких расчетов недоступно для значительного круга пользователей. В настоящее время широкое распространение получили численные пакеты теплофизического моделирования, открытые для учебного или некоммерческого использования: Elcut, Flow Vision, Ansys Fluent, Comsol Multiphysics. При составлении моделей с помощью этих расчетных пакетов важным вопросом становится верификация полученных результатов.

В ходе исследования получено аналитическое решение по определению температурного поля твэла. На основе этого решения составлена программа в MathCAD. В Comsol Multiphysics разработана модель по определению температурного поля твэла с постоянными теплофизическими свойствами в двумерной постановке задачи. Выполнена верификация численной модели с использованием аналитического решения. Установлено влияние количества узлов сетки на точность решения. Аналитическое решение может использоваться для определения температурного поля твэла, находящегося в любой координате по радиусу реактора. Модель определения температурных полей, составленную в MathCAD, можно использовать для верификации разработанных в специализированных пакетах численных моделей определения температурных полей твэлов.

Ключевые слова: твэл, температурное поле твэла, аналитическое решение, математическая модель по определению температурных полей твэлов, верификация численных расчетов, влияние настроечных коэффициентов, безопасность нагрева твэла.

ВВЕДЕНИЕ

Требования безопасности эксплуатации ядерного реактора налагают жесткие ограничения на максимальную температуру топлива [1]. При температуре свыше 1600°C выход газообразных продуктов деления урана резко возрастает. Отсюда вытекает требование технологического регламента по безопасной эксплуатации, устанавливающее мак-

© В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов, 2019

симально допустимую температуру в середине топливного сердечника 1690°C [2].

Активная зона ядерного реактора предназначена для генерации и передачи тепловой энергии с поверхности твэлов теплоносителю. В реакторах ВВЭР-1000 используются гладкостержневые твэлы цилиндрической формы. Установлено, что для однородного реактора мощность энерговыделения реактора по объему пропорциональна плотности потока нейтронов и может определяться следующим выражением [3]:

$$Q(r, z) = Q_0 J_0(2,405r/R_3) \cos(\pi z/H_3), \quad (1)$$

где Q_0 – максимальное значение энерговыделения в центре реактора, МВт; J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; R_3 – эффективный радиус, м; H_3 – эффективная высота, м; r, z – координаты точки расчета по радиусу и высоте соответственно, м (рис. 1).

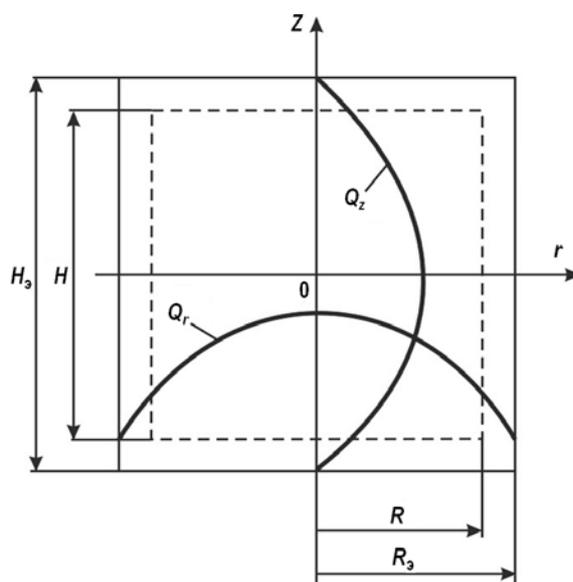


Рис. 1. Распределение энерговыделения по радиусу Q_r и высоте Q_z в однородной цилиндрической активной зоне

Твэл представляет собой герметичную трубку из сплава циркония с ниобием, которая заполняется таблетками из двуокиси урана [4]. Тепловая энергия выделяется внутри двуокиси урана. Так как двуокись урана имеет достаточно низкую теплопроводность, температурное поле в топливном сердечнике распределено очень неравномерно [5].

Для определения температурного поля твэла можно воспользоваться специализированными общедоступными численными программными продуктами, позволяющими построить компьютерную модель течения тепловых потоков внутри активной зоны реактора. После построения и расчета модели требуется ее проверка на основе экспериментальных данных, найти которые достаточно сложно. Также важной задачей, требующей решения в ходе компьютерного моделирования, является определение влияния настроечных коэффициентов (количество узлов сетки, количество шагов по времени и т.д.) на точность результатов работы модели.

Таким образом, одной из целей работы является получение точного аналитического решения для определения температурного поля твэла [6]. С помощью точного аналитического решения необходимо верифицировать численную модель определения температурного поля твэла.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве методов исследования температурного поля твэла используются численные методы моделирования. Построена осесимметричная модель, решенная на основе

уравнения теплопроводности в двумерной постановке задачи с внутренним источником тепловыделения при граничных условиях второго рода на торцах твэла и граничных условиях третьего рода на боковой поверхности стержня [7]. В качестве инструментария для проведения подобных расчетов используется программное обеспечение, недоступное для значительного круга пользователей: БЕРКУТ [8], СОКРАТ, HYDRA, ЕВКЛИД, КОРСАР, RELAP5, MELCOR, ASTEC [9,10]. В ОКБ «Гидропресс» для CFD-расчетов используют такие общепринятые программные продукты, как STAR-CCM+, STAR-CD, ANSYS CFX и ANSYS Fluent [11 – 13]; кроме этих кодов в высших учебных заведениях используются программные продукты Elcud, Flow Vision отечественного производства, а также мультифизический пакет Comsol.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

Задачей исследования является определение температурного поля осесимметричной модели твэла в двумерной постановке задачи с постоянными теплофизическими коэффициентами с учетом внутреннего источника тепловыделения [14, 15]. Для решения поставленной задачи методом конечно-разностных элементов используется программный пакет Comsol Multiphysics. Далее необходимо верифицировать полученные результаты расчета температурного поля твэла по точному аналитическому решению уравнения теплопроводности для твэла [16]. При решении задачи используются граничные условия третьего рода на боковой поверхности твэла, на торцевых поверхностях принимаются условия адиабаты.

При решении задачи вводятся следующие допущения:

- теплофизические свойства двуокиси урана постоянны;
- стержень из двуокиси урана не имеет оболочки из сплава циркония;
- при нагреве твэла не учитывается влияние омывания его поверхности течением жидкости.

Рассмотрим уравнение теплопроводности для твэла

$$\partial T / \partial \tau = \lambda \Delta T / (c\rho) + q / (c\rho), \quad (2)$$

где T – температура внутри стержня, К; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности стержня, Вт/(м·К); c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала стержня, кг/м³; q – удельная мощность энерговыделения одного стержня, Вт/м³.

Задача решена для твэла цилиндрической формы (рис. 2).

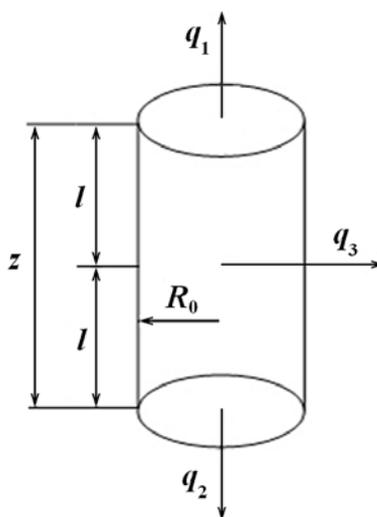


Рис. 2. Геометрические параметры стержня и граничные условия, определяющие решение

Геометрические параметры:

$$\text{полудлина стержня } l = 1,84 \text{ м; радиус стержня } R_0 = 0,0038 \text{ м.} \quad (3)$$

Начальные и граничные условия, определяющие решение:

– начальная температура стержня

$$T(r, z, 0) = T_0 = 592 \text{ К, } r \in [0, R_0], z \in [-l, l], \quad (4)$$

где $T(r, z, 0)$ – температура точек стержня с координатами (r, z) в момент времени $\tau = 0$;

– температура окружающей среды $T_{oc} = 592 \text{ К}$;

– граничные условия третьего рода на торцах стержня (рис. 2)

$$q_1(r, -l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R_0], \quad (5)$$

$$q_2(r, l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R_0], \quad (6)$$

где $q_1(r, -l, \tau)$ – тепловой поток на нижнем торце стержня в точке с координатой r в момент времени τ , Вт/м²; $q_2(r, l, \tau)$ – тепловой поток на верхнем торце стержня в точке с координатой r в момент времени τ , Вт/м²;

– граничное условие третьего рода на боковой поверхности стержня

$$q_3(R_0, z, \tau) = \alpha \cdot (T(R_0, z, \tau) - T_{oc}), \quad z \in [-l, l], \quad (7)$$

где $q_3(R_0, z, \tau)$ – тепловой поток на боковой поверхности стержня, Вт/м² (см. рис. 2); α – коэффициент теплообмена со средой, Вт/(м²·К); $T(R_0, z, \tau)$ – температура точек боковой поверхности стержня в момент времени τ , К; T_{oc} – температура окружающей среды, К.

Окончательно сформулируем в цилиндрической системе координат начально-краевую задачу, необходимую для получения аналитического решения:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = f(r, z), \quad r \in [0, R_0], \quad z \in [-l, l], \quad (8)$$

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad (9)$$

$$|T(0, z, t)| < \infty, \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_c - h(T(R_0, z, \tau) - T_{oc}) = 0, \quad (11)$$

$$T_2(r, -l, \tau) = T_2(r, l, \tau) = 0, \quad (12)$$

$$f(r, z) = f_0 \cos\left(\frac{\pi}{2l + 2\delta} z\right) \cdot J_0\left(\frac{2,405 \cdot R}{R_3}\right), \quad (13)$$

где $T = T(r, z, \tau)$ – температура точек стержня с координатами (r, z) в момент времени τ , К; $f(r, z) = q(r, z)/(c \cdot \rho)$ – отношение удельного энерговыделения, зависящего от координат r, z , к удельной теплоемкости и плотности двуокиси урана, К/с; a^2 – температуропроводность, м²/с; R_0 – радиус твэла, м; l – полудлина твэла, м; $h = \alpha/\lambda$ – отношение коэффициента теплообмена со средой к коэффициенту теплопроводности, 1/м; α – коэффициент теплообмена со средой, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $f_0 = q_0/(c \cdot \rho)$ – отношение максимального удельного энерговыделения в твэле к удельной теплоемкости и плотности двуокиси урана, К/с; δ – эффективная добавка по высоте реактора, м; R – текущий радиус расположения твэла от центра активной зоны, м; R_3 – радиус реактора с учетом эффективной добавки, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе аналитического расчета использовались следующие предположения.

Поскольку отношение R/R_3 мало меняется внутри одного стержня, то значение функции $J_0(2,405 \cdot R/R_3)$ удобно представить в виде постоянного для каждого стержня параметра K , значение которого определяется положением стержня внутри активной зоны.

Так как радиус твэла много меньше его высоты и теплопередача по оси z (см. рис. 2) пренебрежимо мала по сравнению с тепловыделением по боковой поверхности твэла, можно считать, что распределение тепловой энергии по высоте стержня постоянно во времени и совпадает с распределением, заданным на начальной стадии расчета.

С учетом данных предположений получено аналитическое решение в следующем виде:

$$T(r, z, \tau) = T_{0c} + 2K \sum_{i=0}^{\infty} \frac{J_1(x_i) \cdot (1 - e^{-\mu_{0i} a^2 \tau}) \cdot J_0(x_i r / R_0)}{x_i \cdot \mu_{0i} \cdot (J_1^2(x_i) + J_0^2(x_i))} \cdot \frac{f_0}{a^2} \cos\left(\frac{\pi z}{2l + 2\delta}\right) + 2(T_{0c} - T_0) \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{J_1(x_i) \cdot e^{-\mu_{0i} a^2 \tau} \cdot J_0(x_i r / R_0)}{J_0^2(x_i) (x_i^2 + h^2 R_0^2)}, \quad (14)$$

где x_i – корни уравнения $R_0 \cdot h \cdot J_0(z) - x \cdot J_1(z) = 0$; J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка; $\mu_{0i} = x_i^2 / R_0^2$ – квадрат отношения корня x_i к радиусу твэла, $1/m^2$.

На основе этого решения составлена программа в пакете MathCAD. Тестирование программы показало, что при семи и более членах ряда значение максимальной температуры для заданного твэла изменяется незначительно. Для получения температурного поля с точностью до одного градуса достаточно брать девять членов ряда, а с точностью до 0,1 градуса – 15 членов.

Программа, составленная на основе аналитического решения уравнения теплопроводности, может использоваться для определения температурного поля в стационарных и нестационарных режимах работы твэла. Сходимость решения представлена для стационарного режима работы твэла, который наступает при $\tau > 100$ секунд (рис. 3).

Предложенное аналитическое решение с учетом принятых допущений является точным и поэтому может использоваться для верификации численных программ, созданных в других пакетах численного моделирования.

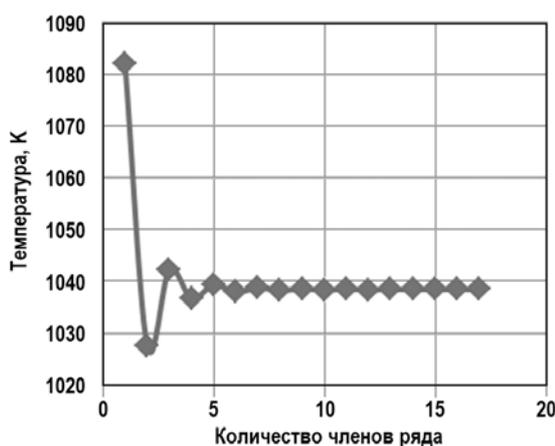


Рис. 3. Зависимость вычисляемого значения максимальной температуры твэла от количества членов ряда решаемой системы уравнений

Для исследования влияния настроечных коэффициентов в численных пакетах на точность определения температурного поля твэла решим эту задачу в пакете Comsol Multiphysics. В качестве настроечных коэффициентов при решении стационарной задачи по определению температурного поля могут использоваться количество узлов сетки, неравномерность узлов сетки, вид сетки (для двумерных задач – треугольная, пря-

моугольная, для трехмерных задач – тетраэдр, гексаэдр, пирамида, призма) [17 – 20]. При решении нестационарных задач одним из настроечных коэффициентов является количество шагов по времени. Задаваемые значения настроечных коэффициентов влияют на точность полученного результата и ресурсы компьютера при выполнении расчета.

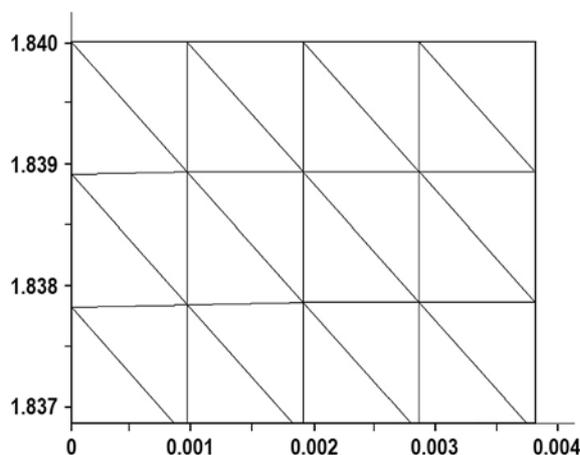


Рис. 4. Сетка для определения температурного поля твэла при решении осесимметричной модели

Таблица 1

Результаты сравнения расчета температурного поля с координатой по радиусу $r = 0$ м

Текущая координата по высоте z , м	Максимальная температура твэла, рассчитанная в Comsol, К	Максимальная температура твэла, полученная в MathCAD, К
0	1038,5	1038,4
0,3	1025,74	1025,3
0,6	986,67	986,79
0,9	925,50	925,06
1,20	843,20	843,78
1,50	748,40	747,71
1,84	628,80	628,11

Таблица 2

Результаты сравнения расчета температурного поля с координатой по высоте $z = 0$ м

Текущая координата по радиусу r , м	Максимальная температура твэла, рассчитанная в Comsol, К	Максимальная температура твэла, полученная в MathCAD, К
0	1038,5	1038,4
0,0006	1029,74	1029,4
0,0012	1002,32	1002,4
0,0018	957,97	957,42
0,0024	893,77	894,42
0,003	813,80	813,42
0,0038	677,50	677,41

Рассмотрим осесимметричную модель твэла с треугольной сеткой (рис. 4).

Температурное поле, рассчитанное в пакете Comsol Multiphysics, совпадает с результатами аналитического решения в MathCAD (табл. 1, 2). Анализ результатов определе-

ния температурного поля твэла проводился на треугольной сетке, которая имела 6961 узел. В качестве модели рассматривалась осесимметричная 2D-модель, в которой была построена 1/4 часть твэла.

Установлено влияние количества узлов сетки на определение значения максимальной температуры твэла. Численный эксперимент, в котором количество узлов варьировалось от 21 до 94657, показал, что количество узлов в этой задаче не влияет на точность результата вычисления максимальной температуры.

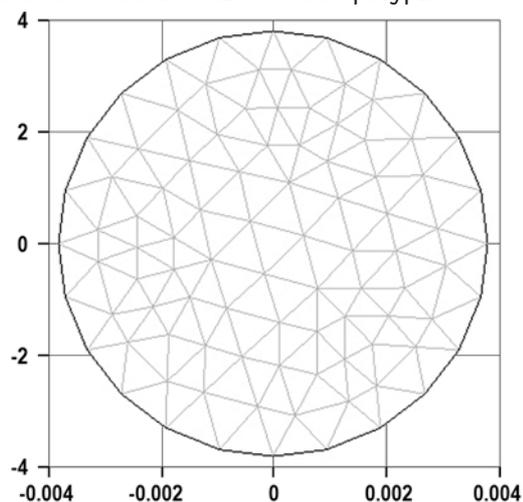


Рис. 5. Треугольная 2D-сетка для твэла

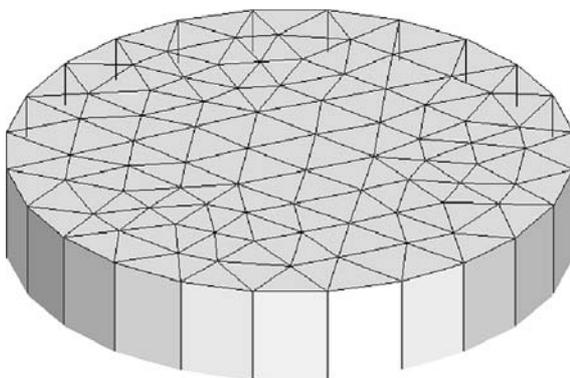


Рис. 6. 3D-сетка для твэла

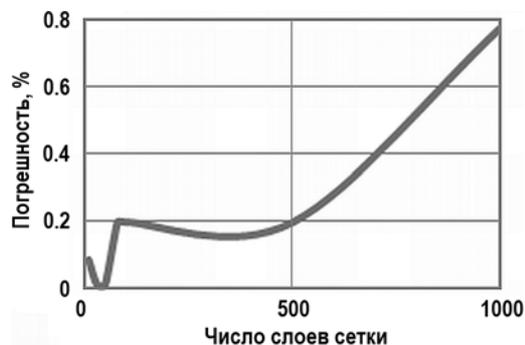


Рис. 7. Зависимость погрешности результата от числа слоев сетки

Для учета влияния теплогидравлики на температурные поля твэла необходимо использовать 3D-модели твэла, у которых сетка имеет форму призмы. В Comsol Multiphysics

есть возможность из 2D-модели сделать 3D-модель за счет экструзии сетки. Пример 2D-сетки показан на рис. 5.

При создании 3D-модели сетка вытягивается по высоте (рис. 6). В этом случае количество элементов сетки влияет на точность результата вычисления максимальной температуры твэла: при самом грубом разбиении сечения на 40 элементов для получения результата с погрешностью в один градус достаточно разбиения сетки на 30 слоев по высоте. При увеличении числа слоев погрешность становится больше, что объясняется накоплением вычислительной ошибки.

При увеличении количества узлов сетки в сечении твэла для получения результата с погрешностью до одного градуса достаточно 10-ти слоев по высоте (рис. 7).

ВЫВОДЫ

1. Получено аналитическое решение осесимметричной модели в двумерной постановке задачи по определению температурного поля твэла с допущениями, что физические свойства топлива не зависят от температуры и стержень из двуокиси урана не имеет оболочки.

2. Математическая модель на основе предложенного аналитического решения составлена в пакете MathCAD и может использоваться для верификации численных моделей определения температурного поля твэла.

Литература

1. Перимов Р.Р., Сорокин Г.А., Сорокина Т.В. Моделирование теплотехнической надежности твэла при различных вариантах изменения энерговыделения и температур // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26. – № 5. – С.150-153.
2. Колпаков Г.Н., Селиванникова О.В. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
3. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Dolgov A. Effective fuel solutions using SNF reprocessing. / JSC «Tvel», International Forum «AtomExpo», Moscow, May 31, 2016.
5. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: Учеб. Пособие. – М.: НИЯУМИФИ, 2011. – 116 с.
6. Гольцев А.О., Давыдова Г.Б., Давиденко В.Д. Влияние депрессии потока нейтронов в ячейке РБМК на величину максимальной и средней температуры топлива // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 5-7.
7. Жуков А.В., Кузина Ю.А., Сорокин А.П. Систематизация исследований теплообмена в сборках твэлов и некоторые задачи жидкометаллического охлаждения. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 95-108.
8. Батенин В.М. и др. Особенности теплообмена тяжелого жидкого металла в ядерных энергоустановках нового поколения. / Тезисы докладов XIII Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс». – Севастополь: СевНТУ, 2017. – С.79-81.
9. Расчетные коды нового поколения. Электронный ресурс: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/68/> (дата доступа 10.06.2018).
10. Вишнякова А.Д., Гулина О.М., Сальников Н.Л. Возможность применения аппарата нейронных сетей для прогнозирования эрозионно-коррозионного износа оборудования АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С.61–71.
11. Велесюк А., Моргунов И. CFD-коды: проблемы и перспективы в атомной энергетике. // Атомный эксперт Информационно-аналитическое издание, приложение к журналу «Атомная энергия». – 1990. – № 8. – С. 37-39.
12. Agranat V., Malin M., Pioro I., Abdullah R., Perminov V. CFD Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow. / Proc. of the ICONE-23, May 17-21, Chiba, Japan. – 2015. – Paper 1163. – 11 p.
13. Карташов К.В., Богословская Г.П. Проведение расчетов по оптимизации геометрии

ческих и режимных параметров ТВС реакторов ВВЭР-СКД для различных режимов эксплуатации реактора на сверхкритических параметрах воды // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 3-11.

14. *Ушаков П.А., Субботин В.И.* Приближенные расчеты гидродинамических характеристик турбулентного потока жидкости в кольцевых каналах. // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10. – № 5. – С. 1025-1030.

15. *Логинов В.С.* Приближенные методы теплового расчета активных элементов электрофизических установок. – М.: Физматлит, 2009. – 273 с.

16. *Старков В.А., Марихин Н.Ю.* Методика и программа расчета стационарного температурного поля в системе многозонных цилиндрических твэлов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 54-62.

17. *Щербакова Т.С., Горбунов В.А.* Исследование задач точности решения с граничными условиями второго рода нагрева в многоцелевом вычислительном комплексе Phoenix / Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго и ресурсосбережение, энергообеспечение, нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» 11-14 ноября 2008 г. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. – 306 с. – С.174-175.

18. *Горбунов В.А.* Прогнозирование точности результатов при решении задач теплообмена на основе нейросетевых технологий. // Промышленная энергетика. – 2011. – № 12. – С. 48-52.

19. *Горбунов В.А.* Опыт использования программного комплекса в Ивановском государственном энергетическом университете им. В.И. Ленина // ANSYS Advantage (русская редакция). – 2011. – № 15. – С. 38-39.

20. *Palmer L.D., Swanson L.L.* Measurements of Heat Transfer Coefficients, Friction Factors and Velocity Profiles for Air Flowing Parallel to Closely Spaced Rods. / Conference of ASME, AIChE and Inst. Ch. E. on Internat. Developments in Heat Transfer. – ASME, Part 3, August 1961. – PP. 535-542.

Поступила в редакцию 15.06.2018 г.

Авторы

Горбунов Владимир Александрович, зав. кафедрой, профессор, д-р техн. наук
E-mail: gorbunov.w@mai.ru

Иванова Наталья Борисовна, доцент, канд. физ.-мат. наук
E-mail: buyasha@yandex.ru

Лоншаков Никита Андреевич, аспирант
E-mail: nik-lon@mail.ru

Белов Ярослав Викторович, студент
E-mail: 230819942@rambler.ru

UDC 621.039.517.5; 004.942

DEVELOPMENT OF THE MODEL TO DETERMINE THE FUEL TEMPERATURE FIELD IN A TWO-DIMENSIONAL PROBLEM STATEMENT

Gorbunov V.A., Ivanova N.B., Lonshakov N.A., Belov Ya.V.

Ivanovo State Power University n.a. V.I. Lenin
34 Rabfakovskaya str., Ivanovo, 153003 Russia

ABSTRACT

Water-cooled water-moderated reactors (VVER) are widely used at Russian nuclear power plants. The VVER reactor core is formed by fuel assemblies consisting of fuel rods. The fuel in fuel rods is uranium dioxide. The safety of the reactor operation is ensured

through stringent requirements for the maximum nuclear fuel temperature. Calculation of temperature fields within the reactor core requires associated problems to be solved to determine the internal energy release in fuel based on neutronic characteristics. Dedicated software for such calculations is not accessible to a broad range of users. At the present time, there are numerical thermophysical modeling packages available for training or noncommercial applications which are used extensively, including Elcut, Flow Vision, Ansys Fluent, and Comsol Multiphysics. Verification of the obtained results is becoming an important issue in building models using these calculation packages.

An analytical solution was obtained as part of the study for the fuel temperature field determination. A program was developed in MathCAD based on this solution. A model was developed in Comsol Multiphysics to determine the fuel temperature field with constant thermophysical properties in a two-dimensional problem statement. The numerical model was verified using the analytical solution. The influence of the number of the grid nodes on the solution accuracy was established. The analytical solution can be used to determine the fuel temperature field at any radial coordinate of the reactor. The temperature field determination model developed in MathCAD can be used to verify numerical models of the fuel temperature field determination developed in dedicated packages.

Key words: fuel rod, fuel temperature field, analytical solution, mathematical model to determine fuel temperature fields, verification of numerical calculations, influence of tuning coefficients, safety of fuel rod heating.

REFERENCES

1. Perimov R.R., Sorokin G.A., Sorokina T.V. Modeling of thermal-mechanical reliability of the fuel rod with different variants of change of energy; guideline and temperatures. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2004, v. 26, iss. 5, pp. 150-153 (in Russian).
2. Kolpakov G.N., Selivanikova O.V. *Designs of Fuel Rods, Channels and Cores of Power Reactors*. Tomsk. Tomskij Politihnicheskij Universitet Publ., 2009, 118 p. (in Russian).
3. Dement'ev B. A. *Nuclear Power Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990, 352 p. (in Russian).
4. Dolgov A. Effective fuel solutions using SNF reprocessing. International Forum «AtomExpo», Moscow, JSC «Tvel», May 31, 2016.
5. Leskin S.T., Shelegov A.S., Slobodchuk V.I. Physical features and design of the VVER-1000 reactor. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2011, 116 p. (in Russian).
6. Golcev A.O., Davydova G.B., Davidenko V.D. The Influence of depression of the neutron flux in the RBMK cell on the magnitude of the maximum and average fuel temperature. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2009, v. 314, iss. 4, pp. 5-7 (in Russian).
7. Zhukov A. V., Kuzina Y.A., Sorokin A.P. Systematization of Research of Heat Exchange in Fuel Rod Assemblies and Some Tasks of Liquid Metal Cooling. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2009, no. 4, pp. 95-108 (in Russian).
8. Batenin V.M., Beljaev I.A., Listratov J.I. Features of heat exchange of heavy liquid metal in nuclear power plants of new generation]. Proc. of the XIIIth International Scientific and Practical Conference on Atomic Energy «Bezopasnost', Effektivnost', Resurs». Sevastopol'. SevNTU Publ., 2017, pp. 79-81 (in Russian).
9. Design Codes of New Generation. Available at: <http://www.ibrae.ac.ru/contents/68/> (accessed Jun 10, 2018) (in Russian).
10. Vishnyakova A.D., Gulina O.M., Salnikov N.L. The possibility of using the neural network apparatus for predicting erosion and corrosion wear of NPP equipment. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2015, no. 4, pp. 61-71 (in Russian).
11. Velesjuk A., Morgunov I. CFDs-codes: problems and prospects in nuclear power engineering. *Atomnyj Ekspert. Appendix to Atomnaya Energiya*. 1990, no. 8, pp. 37-39 (in Russian).

12. Agranat V., Malin M., Pioro I., Abdullah R., Perminov V.A. CFD Modelling of Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube Upward Flow. Proc. of the ICONE-23, May 17-21, Chiba, Japan, 2015. Paper 1163. 11 p.
13. Kartashov K.V., Bogoslovskaya G. P. Calculations for optimization of geometric and regime parameters of VVER-SKD fuel assemblies for different operating modes of the reactor at supercritical water parameters. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 2, pp. 3-11.
14. Ushakov P.A., Subbotin V.I. Approximate calculations of hydrodynamic characteristics of turbulent fluid flow in ring channels. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 1972, v. 10, no. 5, pp. 1025-1030 (in Russian).
15. Loginov V.S. *Approximate Methods of Thermal Calculation of Active Elements of Electrophysical Installations*. Moscow. Fizmatlit Publ., 2009, 273 p. (in Russian).
16. Starkov V.A., Marihin N.Yu. Method and program of calculation of stationary temperature field in the system of multi-zone cylindrical fuel rods. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 1, pp. 54-62 (in Russian).
17. Scherbakova T.S., Gorbunov, V.A. The study of problems of accuracy of the solution with boundary conditions of 2nd kind of heating in the multipurpose computing complex of Phoenix. Proc. of the All-Russian Student Olympiad, Scientific and Practical Conference and Exhibition of Students, Postgraduates and Young Scientists «Ergo- i resursoberezhenie, energoobespechenie, netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki energii». Ekaterinburg. UGTU-UI Publ., pp. 174-175 (in Russian).
18. Gorbunov V.A. Predicting the accuracy of results in solving heat transfer problems based on neural network technologies. *Promyshlennaya Energetika*. 2011, no. 8, pp. 48-52 (in Russian).
19. Gorbunov V.A. Experience in using the software complex at Ivanovo state power engineering University n.a. V.I. Lenin. *ANSYS Advantage (Russkaya Redaktsiya)*. 2011, no. 15, pp. 38-39 (in Russian).
20. Palmer L.D., Swanson L.L. Measurements of Heat Transfer coefficients, Friction Factors and Velocity Profiles for Air Flowing Parallel to Closely Spaced Rods. Proc. of the Conf. of ASME, AIChE and Inst. Ch. E. on Internat. Developments in Heat Transfer. ASME, part 3, August 1961, pp. 535-542.

Authors

Gorbynov Vladimir Alexandrovich, Research Supervisor, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: gorbynov.w@mai.ru

Ivanova Natalya Borisovna, Assistant Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: buyasha@yandex.ru

Lonshakov Nikita Andreevich, PhD Student

E-mail: nik-lon@mail.ru

Belov Yaroslav Viktorovich, Student

E-mail: 230819942@rambler.ru