

ВОССТАНОВЛЕНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГЕТЕРОГЕННОГО РЕАКТОРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ В ГОМОГЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ

В.С. Кузеванов *, С.К. Подгорный **

* Филиал МЭИ

404110, Волгоградская обл., г. Волжский, просп. Ленина, 69

** Филиал ПАО «Россети Юг» – Волгоградэнерго

404122, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. 6-я Автодорога, 10



Усовершенствованные реакторы с водой под давлением в качестве теплоносителя являются основной частью нового поколения разрабатываемых проектов атомных станций, обеспечивающих экономически эффективное производство энергии для различных нужд [1 – 6]. Инновационные технологии направлены на повышение безопасности, надежности и снижение стоимости станции. При этом совершенствование конструктивных, технологических и компоновочных решений касается, в первую очередь, активной зоны реактора. Оценка эффективности усовершенствования предшествует численное моделирование процессов в активной зоне, в частности, процессов генерации и отвода тепла, с учетом отличия объекта исследования от типового варианта, проверенного эксплуатационной практикой.

Работа посвящена созданию метода расчета температурного поля в активной зоне гетерогенного реактора на примере реактора с водой под давлением, позволяющего производить оперативную оценку по уровню температурной безопасности множественных вариантов изменений активной зоны и обладающего необходимым быстродействием для анализа переходных процессов в реальном времени.

Основой метода явилось использование уравнения энергии для эквивалентной гомогенной зоны в форме уравнения теплопроводности, учитывающей основные особенности моделируемой гетерогенной структуры. В процедуре восстановления температурного поля гетерогенного реактора применяется полученное в настоящей работе аналитическое соотношение для функции стока тепла, учитываются межкассетные тепловые перетечки.

Проведены расчеты температурных полей в модели реактора типа PWR [7] в стационарных и переходных режимах его работы. Показано сравнение результатов расчетов с результатами CFD-моделирования. Указана область конкурирующего использования метода восстановления температурного поля.

Ключевые слова: температурное поле, реактор, активная зона, уравнение теплопроводности, функция стока тепла, твэл, реальное время.

© В.С. Кузеванов, С.К. Подгорный, 2022

ВВЕДЕНИЕ

Внимание к реакторам с водой под давлением подтверждается не только их распространённостью как энергетического источника в разнообразных типах ядерных энергетических установок (ЯЭУ) – и стационарных, и транспортных, включая космические, но и постоянным совершенствованием существующих конструктивных, технологических и компоновочных решений, касающихся, в первую очередь, активной зоны реактора. Очевидная нереализуемость большинства натурных испытаний по подтверждению эффекта совершенствования привела к развитию имитационных стендовых испытаний моделей элементов активных зон. Однако в любом случае экспериментальному исследованию предшествует численное моделирование.

Все вычислительные коды гетерогенных активных зон сложны, требуют значительных вычислительных мощностей и имеют индивидуальные ограничения по области использования. Иное дело – гомогенная активная зона, более того, представленная как сплошная среда. Для такой активной зоны уравнение энергии может быть записано в форме уравнения теплопроводности [8 – 10]. Численное решение такого уравнения можно организовать как эффективную процедуру с малым временем счета при доступной любому пользователю вычислительной мощности.

В работе поставлена задача построить алгоритм воспроизведения температурного поля в гетерогенной активной зоне в стационарных и переходных процессах по результатам расчета температуры в эквивалентной гомогенной активной зоне ядерного реактора.

МОДЕЛЬ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Рассмотрим для определенности и конкретизации получаемых далее соотношений активную зону реактора типа PWR [7], загруженную квадратными в поперечном сечении ТВС. Тепловыделяющие элементы расположены в ТВС в узлах квадратной решетки с шагом a_1 . ТВС чехлов не имеют. Геометрические параметры и состав твэлов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры и состав твэлов

Элемент твэла	Размеры			Материал
	Диаметр, мм	Толщина, мм	Длина, мм	
Оболочка	9.14	–	3658	Сплав Zircaloy 4
Газовый зазор	–	0.157		Гелий
Топливный стержень	7.844	–		Диоксид урана

ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОДЕЛИ

- Давление охлаждающего теплоносителя на входе в активную зону P_{in} , его температура T_{in}^2 и его массовый расход G известны; давление теплоносителя P_{out} на выходе из активной зоны одинаково для всех ТВС.
- Обмен теплоносителем между соседними ТВС происходит на равномассовой основе. Массовый расход теплоносителя в любой ТВС по её высоте z не меняется.
- Элементарным каналом ТВС определим виртуальный канал, в центре квадратного со стороной a_1 поперечного сечения которого расположен единичный твэл с наружным диаметром оболочки d_{sh} .
- Объёмные тепловыделения q_v в каждом из твэлов и массовые расходы теплоносителя в элементарных каналах любой ТВС одинаковы. Боковые границы каналов проницаемы. Связь гидравлических потерь с массовым расходом теплоно-

сителя в любой ТВС или элементарном канале можно представить соотношением Дарси-Вейсбаха.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ

• При исследовании изменения поля температуры T во времени τ активная зона в целом представлена как сплошная среда. При этом в численном расчете элементарный объём совпадает с элементарным каналом как его часть с размером Δz по аксиальной координате z . Параметры сплошной среды являются средневзвешенными. Каждый расчетный объём имеет источники и стоки тепла.

• При анализе изменения температуры теплоносителя и определении мощности стокового члена активная зона рассматривается как гетерогенная, составленная из элементарных каналов, включающих в себя дискретные компоненты « i ». В качестве компонентов гетерогенного расчетного объёма рассматривается теплоноситель (вода, индекс любого параметра теплоносителя «2»), оболочки твэла (металл, индекс параметров « sh »), газовый зазор между оболочкой и топливом в твэле (газ, индекс параметров « g »), топливо (двухись урана, индекс параметров « f »).

• Единичный элементарный канал является моделью соответствующей ТВС в анализе температурного поля активной зоны реактора.

• Тепломассообмен между соседними эквивалентными каналами описывается в квазистационарном приближении.

ГОМОГЕННАЯ АКТИВНАЯ ЗОНА. УРАВНЕНИЕ СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Активная зона описывается как сплошная среда со средневзвешенными температурами в расчетных ячейках. В качестве уравнения сохранения энергии используется уравнение теплопроводности в форме [8 – 10]

$$\Phi \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_{ef} \operatorname{grad} T) + q_v - q_{v,st}, \quad (1)$$

где $\Phi = \sum \varepsilon_i$; λ_{ef} – эффективная теплопроводность моделируемой системы $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; q_v – удельное объёмное энерговыделение, $\text{Вт}/\text{м}^3$; $q_{v,st}$ – функция стока тепла, отражающая отвод тепла с поверхности твэла на единицу объёма, $\text{Вт}/\text{м}^3$; средневзвешенная температура в расчётной ячейке расчётного объёма $T = \sum T_i \cdot \varepsilon_i^*$, $\varepsilon_i^* = \varepsilon_i / \Phi$; $\varepsilon_i = (\rho \cdot c \cdot \varphi)_i$, причём ρ , c и φ – плотность, удельная теплоёмкость и объёмная доля компонента гетерогенной активной зоны в расчётном объёме соответственно.

ГЕТЕРОГЕННАЯ АКТИВНАЯ ЗОНА. ФУНКЦИЯ СТОКА ТЕПЛА

Проведенный анализ показал, что для активной зоны реактора с водой под давлением может быть использовано соотношение для определения отвода тепла с поверхности твэла в нестационарном процессе, полученное в работе [10] для активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора:

$$q_{v,st} = \sigma \{ q^0(z, r) f^\sim + P^\sim \}, \quad (2)$$

где $\sigma = F/V$; F – теплообменная поверхность единичного твэла, м^2 ; V – объём расчетной ячейки, м^3 ; q^0 – плотность теплового потока на единицу поверхности твэла, $\text{Вт}/\text{м}^2$ (индекс «0» – стационарное (исходное) состояние); f^\sim – функция времени, пространственных координат (z, r) и возмущающих воздействий; P^\sim – функция, отражающая влияние граничных условий.

Одной из особенностей использования соотношения (2) является необходимость определения истинного подогрева охлаждающего теплоносителя в каждом элемен-

тарном канале с учётом тепловых перетечек между ними, что возможно только при рассмотрении конструктивных и гидродинамических особенностей гетерогенной активной зоны.

ГЕТЕРОГЕННАЯ АКТИВНАЯ ЗОНА. РАСЧЁТ ПОДОГРЕВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

С учетом принятой физической модели активной зоны уравнение теплового баланса для канала «*j*» активной зоны с квадратными ТВС в стационарном режиме выглядит так:

$$G_j \Delta h_j = \int_{\delta_{ef}}^{H+\delta_{ef}} (\pi d_{sh} q_j + a_1 q_{n,j}) dz = \pi d_{sh} H \langle q_j \rangle + a_1 H \langle q_{n,j} \rangle, \quad (3)$$

где $\Delta h_j = c_{2,j} \Delta T_j$, h – удельная энтальпия теплоносителя, Дж/кг; $\langle q_{n,j} \rangle$ – средняя плотность потока тепла от других ТВС, Вт/м²; a_1 – поперечный размер ячейки, содержащей один твэл, м; H – высота активной зоны, м; ΔT – подогрев теплоносителя в канале, °C.

Определим для произвольного поперечного сечения z канала j плотность потока тепла $q_{n,j}$ как $q_n = q_{n,j,1} - q_{n,j,2}$. Полагаем, что составляющие теплового потока $q_{n,j,1}$ и $q_{n,j,2}$ через виртуальную боковую поверхность канала могут быть представлены в виде

$$q_{n,j,1} = \lambda_{ef,j-1} \frac{T_{2,j-1} - T_{2,j}}{a_2}, \quad q_{n,j,2} = \lambda_{ef,j} \frac{T_{2,j} - T_{2,j+1}}{a_2}, \quad (4)$$

где λ_{ef} – средний по высоте канала эффективный коэффициент теплопроводности теплоносителя, учитывающий молекулярную и турбулентную составляющие переноса тепла, Вт/(м·°C); a_2 – эффективное расстояние между соседними ТВС, м.

Определим эффективный коэффициент теплопроводности λ_{ef} из следующих соображений. Положим, что изменение интенсивности теплообмена на греющей поверхности при переходе ламинарного режима течения жидкости в турбулентный напрямую связано с общим изменением теплопроводящих свойств среды. Тогда имеем

$$\alpha_l = \alpha_t \lambda / \lambda_{ef} \quad (5)$$

где α и λ – коэффициенты теплоотдачи и молекулярной теплопроводности соответственно (индекс «*l*» относится к ламинарному, а индекс «*t*» – к турбулентному режиму течения теплоносителя).

Для ламинарного режима на стабилизированном участке в круглой трубе решение интегрального соотношения Лайона для ламинарного потока жидкости приводит к равенству $Nu_l = A = \text{const}$.

Распространяя соотношение $Nu_l = A$ на каналы произвольной формы с эквивалентным диаметром d_e , получаем из (5) выражение для эффективной теплопроводности

$$\lambda_{ef} = \alpha_t \cdot d_e / A. \quad (6)$$

Преобразование уравнения (3) в удобную для анализа систему алгебраических уравнений связи расходных, гидравлических и термодинамических параметров каналов проведено с использованием формулы Б.С. Петухова для расчета Nu_t [11]. Если объединить как идентичные (т.е. имеющие одинаковые тепловую нагрузку и расход теплоносителя) ТВС под одним номером группы каналов «*j*», обозначить «*m*» – число таких групп, то, в случае нумерации от центра активной зоны, преобразованная система уравнений будет выглядеть так:

$$\begin{aligned} & G_j c_{p,j} \Delta T_j (1 + 0,5 C_1 \xi_j (\delta_1 + \delta_2 \cdot Y_j)) = \\ & = v_j \frac{\varrho_p}{N \cdot n^2} + 0,5 G_j c_{p,j} C_1 \xi_j [\delta_2 \cdot Y_j \cdot \Delta T_{j-1} + \delta_1 \Delta T_{j+1}]; \\ & 1 \geq j \geq m. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь ξ – коэффициенты сопротивления трению;

$$\delta_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } j = m; \\ 1, & \text{если } j \neq m; \\ 2, & \text{если } j = 1; \end{cases} \quad \delta_2 = \begin{cases} 0, & \text{если } j = 1; \\ 1, & \text{если } j \neq 1; \end{cases} \quad (8)$$

$Y_j = \xi_{m-1} G_{m-1} / \xi_m G_m$; $C_1 = (Hb^*)/L$; $L = Aa^*_2/a_1$ – константа теплообмена между ТВС; $a^*_2 = a_2 n$; $b^* = C_t / 2\pi d [K + \varepsilon(\Pr)]$; K и $\varepsilon(\Pr)$ – температурная поправка и коэффициенты формулы Петухова для Nu_t [11]; n^2 – число твэлов в квадратной ТВС; N – число ТВС.

Система уравнений (7) дополняется системой уравнений для перепада давления в группе идентичных ТВС в форме уравнений Дарси-Вейсбаха [12].

КОНКРЕТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ЗНАЧЕНИЯ $q_{v,st}^0$

Для системы взаимосвязанных каналов $q_{v,st}^0$ предложено определять так:

$$q_{v,st}^0 = k(T^0 - T^0_2), \quad (9)$$

где для квадратной решетки расположения твэлов

$$k = \frac{\pi}{a_1^2} \left\{ \left(\frac{R_{l1}}{2} + R_{l2} \right) \varepsilon_{sh}^* + \left[R_{l1} + R_{l2} + \frac{1}{8\lambda_f} \right] \varepsilon_f^* \right\}^{-1}. \quad (10)$$

Отметим, что в соотношении (10) R_{l1} и R_{l2} – линейное термическое сопротивление оболочки (включая газовый зазор) и теплоотдачи соответственно.

Использование выражения (9) в уравнении

$$\text{div}(\lambda_{ef} \text{grad } T) + q_{v,st}^0 - k(T - T^0_2) = 0 \quad (11)$$

в совокупности с системой уравнений (7) позволяет легко определить стационарное распределение температуры в активной зоне реактора.

РАСЧЕТ ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ f_τ

Безразмерная функция времени f_τ входит в соотношения для определения f^\sim и P^\sim (2) [9, 10]. В случае высокой тепловой проводимости гетерогенной системы ($k/\Phi \gg 1$) при известных стационарных полях $T^0(\tau = 0)$, $T^\infty(\tau \rightarrow \infty$ после воздействия возмущающих факторов), $f_\tau = f^* \tau = (T - T^0)/(T^\infty - T^0)$, что подтверждено расчетами температурных полей газоохлаждаемого реактора [9, 10].

Аналитические и расчетные исследования авторов показали возможность использования следующих зависимостей при расчете функции f_τ для активных зон реакторов типа PWR:

$$f_\tau = \begin{cases} f_\tau^*, & \text{если } k_\tau = 1, k_g = 1; \\ A_1^{-1} f_\tau^* + 1 - A_1^{-1} - (1 - A_1^{-1} - \delta f_\tau) \exp(-A_2 \tau / B), & \text{если } k_\tau \neq 1 \text{ и } k_g \neq 1. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь используются следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \delta f_\tau &= (1 - \varepsilon_f^*) (\delta T_2 - \Delta_2) / \delta T; \quad \delta T_2 = T^\infty_2 - T^0_2; \quad \delta T = T^\infty - T^0; \\ B &= \delta T [1 - (1 - \varepsilon_f^*) \Delta_2] / \delta T; \quad A_2 = (\delta T_{sh} - \Delta_2) k_a \sigma_0 \alpha / \Phi; \\ \delta T_{sh} &= (T'_{sh})^\infty - (T'_{sh})^0; \quad \Delta_2 = \delta T_2 - (k_\tau - k_g^{-1}) (T^0_2)^{in} + (1 - k_g^{-1}) T^0_2; \\ A_1 &= [(1 - \varepsilon_f^*) \Delta_2 + A_2 \Phi(k)^{-1}] / \delta T; \end{aligned} \quad (13)$$

k_i – отношение новых стационарных значений возмущающих параметров к исходным; T'_{sh} – температура наружной поверхности оболочки твэла.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГЕТЕРОГЕННОГО РЕАКТОРА

Результаты расчёта средневзвешенной температуры при представлении активной зоны как эквивалентной гомогенной легли в основу процедуры восстановления температурного поля в элементах любой расчетной ячейки – теплоносителе, оболочке и топливе. В теплоносителе детализация температурного поля не производилась – принималось во внимание только средняя его температура в поперечном сечении элементарного канала и равенство температур теплоносителя и оболочки на наружной поверхности твэла. Принято, что профиль температуры в оболочке твэла остается логарифмическим, а в топливе описывается степенной функцией в течение всего переходного процесса. В рамках этих модельных приближений процедура восстановления температурного поля в любой расчетной ячейке активной зоны выглядит просто.

Действительно, в момент времени τ после начала переходного процесса в активной зоне, вызванного скачкообразным изменением какого-либо из параметров или нескольких параметров, влияющих на распределение температуры в активной зоне, в результате расчета эквивалентной гомогенной зоны непосредственно известны поля

- средних температур T_2 ;
- значений функции стока тепла $q_{v,st}$;
- средневзвешенной температуры T .

Пренебрегая тепловой инерционностью тонкой оболочки, дополнительно вычисляем температуру на внешней T'_{sh} и внутренней T''_{sh} поверхностях оболочки:

$$T'_{sh} = T_2 + q_{v,st} \cdot a_1^2 \cdot R_{l2}/\pi; \quad T''_{sh} = T'_{sh} + q_{v,st} \cdot a_1^2 \cdot R_{l1}/\pi \quad (14)$$

и находим среднее значение T_{sh} . Среднее значение температуры топлива T_f находим из определения средневзвешенной температуры при известных T_2 , T_{sh} и T . Аппроксимирующей температурный профиль в топливе считаем квадратичную функцию.

Максимальное значение температуры в топливе расчетной ячейки T_f^{\max} определяем согласно зависимости

$$T_f^{\max} = 2T_f - T''_{sh}. \quad (15)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассматривался расчетный вариант модели активной зоны, состоящей из m групп идентичных квадратных в поперечном сечении элементарных ячеек размером a_1 [20].

По тепловым, конструктивным, расходным и температурным характеристикам расчетная активная зона соответствует зоне PWR [7], кроме радиальных размеров: один элементарный канал в модельной ТВС ($n^2 = 1$) сборки из $n^2 = 289$ идентичных элементарных каналов в реальной ТВС.

РАСЧЕТ ПОЛЯ СРЕДНЕВЗВЕШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРОЦЕССЕ

На рисунках 1, 2 представлены результаты исследований изменений полей средневзвешенных температур после внесения скачкообразных возмущений в стационарную работу реактора. Исследовалось комплексное возмущение и возмущение по одному параметру – по тепловой мощности реактора. Комплексное возмущение: одновременное изменение мощности реактора, температуры на входе в активную зону и расхода теплоносителя, а также коэффициента теплоотдачи, согласованного с изменением названных параметров. Распределение средневзвешенной температу-

ры в модели активной зоны было рассчитано методом установления по неявной схеме решения уравнения (1) с использованием системы уравнений (7) для определения подогревов теплоносителя в элементарных каналах [20].

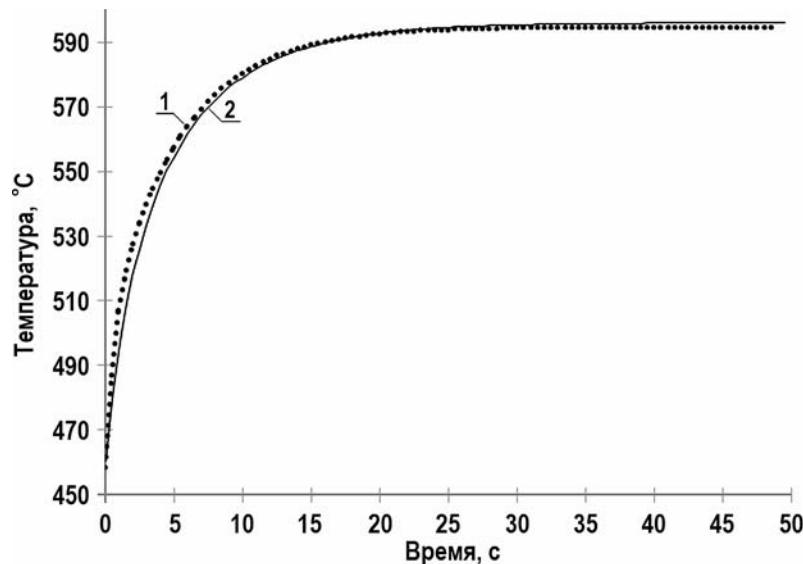


Рис. 1. Сравнение средней температуры в активной зоне при набросах тепловой мощности на 50%, массового расхода теплоносителя на 20% и температуры теплоносителя на входе в активную зону на 20%: 1 – CFD-моделирование; 2 – разработанный алгоритм

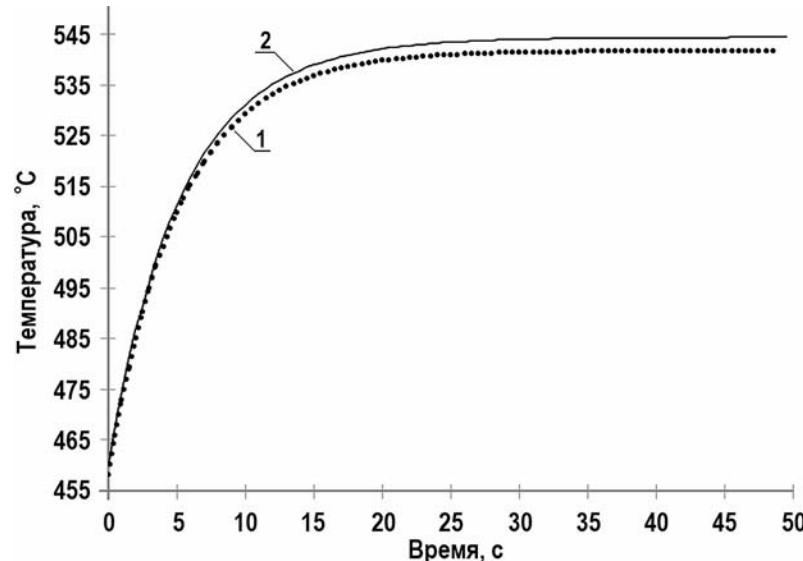


Рис. 2. Сравнение средней температуры в активной зоне при набросе тепловой мощности на 50%: 1 – CFD-моделирование; 2 – разработанный алгоритм

На рисунках 3, 4 изображены восстановленные температурные поля для диаметрального сечения твэлов в расчётных ячейках с указанными относительными координатами центров ячеек для разных моментов времени переходного процесса. Для сравнения на этих же рисунках отмечены значения температуры, полученные в результате CFD-моделирования переходного процесса. Поскольку максимальное отличие сравниваемых значений температуры в сходственных точках поперечного сечения элементарных ячеек не превышает 50°C , то можно признать авторский метод

восстановления температурного поля гетерогенного реактора вполне удовлетворительным подходом к описанию изменения температуры в элементах активной зоны ядерного реактора в переходных процессах.

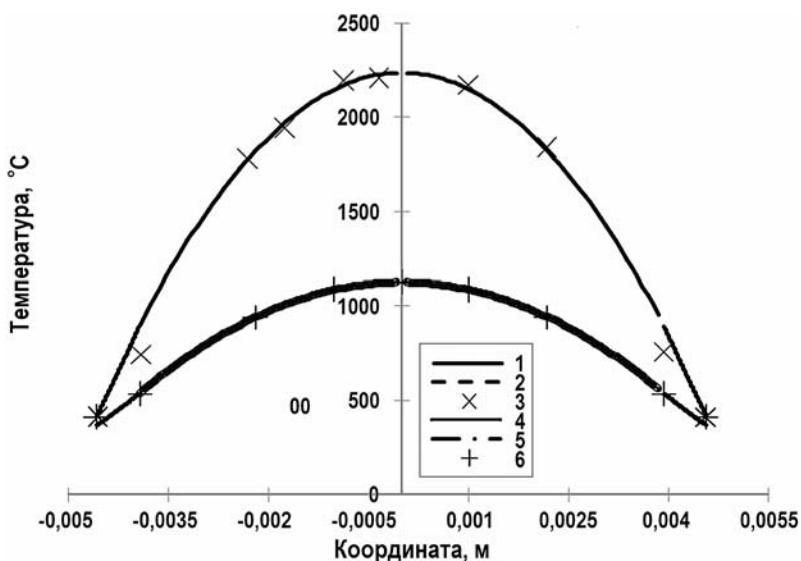


Рис. 3. Сравнение восстановленных температурных полей твэлов с результатами CFD-моделирования для времени 5 секунд с начала переходного процесса, представленного на рис. 1: 1 – температура топлива центрального твэла (в центральной плоскости активной зоны); 2 – температура оболочки центрального твэла (в центральной плоскости активной зоны); 4 – температура топлива твэла канала № 4 на расстоянии 0,976 м ниже центральной плоскости активной зоны; 5 – температура оболочки твэла канала № 4 на расстоянии 0,976 м выше центральной плоскости активной зоны; 1, 2, 4, 5 – разработанный алгоритм; 3, 6 – CFD-моделирование

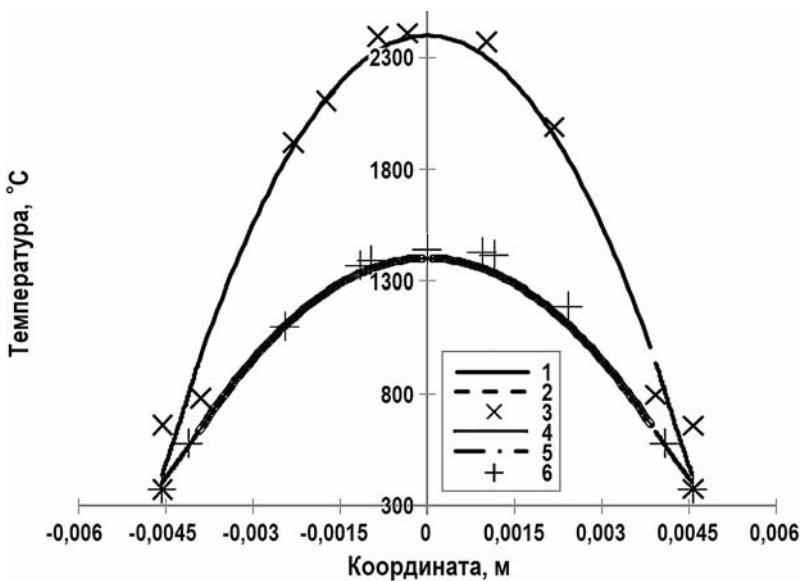


Рис. 4. Сравнение восстановленных температурных полей твэлов с результатами CFD-моделирования для времени 10 секунд с начала переходного процесса, представленного на рис. 1: 1 – температура топлива центрального твэла (в центральной плоскости активной зоны); 2 – температура оболочки центрального твэла (в центральной плоскости активной зоны); 4 – температура топлива твэла канала № 4 на расстоянии 1,22 м выше центральной плоскости активной зоны; 5 – температура оболочки твэла канала № 4 на расстоянии 1,22 м выше центральной плоскости активной зоны; 1, 2, 4, 5 – разработанный алгоритм; 3, 6 – CFD-моделирование

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод восстановления температурного поля гетерогенного реактора не претендует на улучшенную детализацию распределения температуры в элементах активной зоны в сравнении с результирующим описанием температурного поля при использовании CFD-моделирования. Однако в ряде случаев авторский подход, изложенный в работе, может быть полезен, поскольку имеет следующие преимущества:

- мобильная доступность необходимых для проведения расчетов вычислительных мощностей;
- малое время полного расчета распределения температуры в интересующей исследователя локальной области активной зоны – примерно на два порядка меньше, чем при использовании базовых алгоритмов CFD-моделирования;
- возможность оперативного предварительного расчета множества вариантов конструктивно отличающихся активных зон для выбора ограниченного их числа с целью последующего уточняющего анализа.

Заметим, что время расчета температурного поля методом восстановления меньше времени переходного процесса. В таком случае подобная вычислительная процедура может быть элементом комплексной программы, описывающей динамику реакторного контура, например, в программном комплексе тренажёра ЯЭУ. Кроме того, не исключено использование алгоритма восстановления в системах управления оборудованием ЯЭУ для коррекции управления по прогнозу изменения температурного поля.

Литература

1. Бойко В.И., Демянюк Д.С., Кошелев Ф.П., Мещеряков В.Н., Шаманин И.В., Шидловский В.В. Перспективные ядерные топливные циклы и реакторы нового поколения. – Томск: Издательство ТПУ, 2005. – С. 5-60.
2. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонин В.И., Демешев Р.С., Рекшня Н.Ф. Конструирование ядерных реакторов. – М.: Энергоиздат, 1982. – С. 56-76.
3. Баклушин Р.П. Эксплуатация АЭС. Ч. 1. Работа АЭС в энергосистемах. – М: НИЯУ МИФИ, 2011. – С. 121-134.
4. Обзор ядерных технологий 2019. – Вена: МАГАТЭ, 2019. – С. 1-3.
5. Bays S., Abou Jaoude A., Borloden G. Reactor Fundamentals Handbook. – Idaho Falls: Idaho National Laboratory, 2019. – PP. 22-31. DOI: <https://doi.org/10.2172/1615634>.
6. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – С. 429-435.
7. The Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Plant. – Pittsburgh: Westinghouse Electric Corporation, 1984. – PP. 15-18.
8. Кузеванов В.С., Закожурников С.С., Закожурникова Г.С., Гаряев А.Б. Модели процессов и расчет температурного поля в печах сопротивления для производства карбида кремния. // Вестник ИГУЭ. – 2017. – № 420. – С. 21-29. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.4.021-029>.
9. Кузеванов В.С., Подгорный С.К. Температурное поле в активной зоне газоохлаждаемого ядерного реактора в переходных режимах при различных условиях профилирования массового расхода. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 55. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2019.3.05>.
10. Кузеванов В.С., Подгорный С.К. Газоохлаждаемые реакторы. Профилирование и интенсификация теплообмена. – Кишинев: Palmarium Academic Publishing, 2019. – 84 с.
11. Петухов Б.С., Кириллов В.В. О теплоотдаче при турбулентном течении в трубах. // Теплоэнергетика. – 1958. – № 4. – С. 29-31.

12. Кузеванов В.С., Подгорный С.К. Профилирование активной зоны газоохлаждаемого ядерного реактора с использованием интенсификаторов теплообмена. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 31-42. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2018.4.03>.
13. ANSYS Fluent. User's Guide. – Canonsburg: ANSYS Inc, 2016. – PP. 238-247.
14. ANSYS Fluent. Customization Manual. – Canonsburg: ANSYS Inc, 2016. – PP. 91-100.
15. ANSYS Fluent. Theory Guide. – Canonsburg: ANSYS Inc, 2016. – PP. 137-177.
16. Shaw C.T. Using Computational Fluid Dynamics. – New Jersey: Prentice Hall, 1992. – PP. 100-137.
17. Anderson J., Dick E., Dergez G., Grundmann R., Degroote J., Vierendeels J. Computational Fluid Dynamics: An Introduction. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – PP. 10-17.
18. Petrila T., Trif D. Basics of Fluid Mechanics and Introduction to Computational Fluid Dynamics. – Boston: Springer, 2005. – PP. 197-239.
19. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model. – New Jersey: Wiley, 1994. – PP. 51-62.
20. Podgorny S.K., Kuzevanov V.S. Temperature Field in Pressurized Water Reactor with Uncased Fuel Assemblies. / Proc. of the XI International Scientific Conference «The Latest Research in Modern Science: Experience, Traditions and Innovations». – Morrisville, North Carolina, USA, 7-8 July, 2020. – PP. 20-31.

Поступила в редакцию 27.09.2021 г.

Авторы

Кузеванов Вячеслав Семёнович, профессор, доктор технических наук
E-mail: vyacheslavkuzevanov@gmail.com.

Подгорный Сергей Константинович, специалист по охране труда, магистр
E-mail: serkonpod@gmail.com

UDC 621.039.51

REAL-TIME TEMPERATURE FIELD RECOVERY OF A HETEROGENEOUS REACTOR BASED ON THE RESULTS OF CALCULATIONS IN A HOMOGENEOUS CORE

Kuzevanov V.S.*, Podgorny S.K.**

* Branch of MPEI

69 Lenina Str., 404110 Volzhsky, Volgograd Reg., Russia

** Branch of PJSC «Rosseti Yug» – Volgogradenergo

10 Shestaya Avtodoroga Str., 404122 Volzhsky, Volgograd Reg., Russia

ABSTRACT

Advanced pressurized water reactors are the main part of a new generation of nuclear power plant projects under development that provide cost-effective power production for various needs [1 – 6]. The innovative technologies are aimed at improving the safety and reliability as well as at reducing the cost of NPPs. At the same time, improvements in design, technological and layout solutions are focused primarily on the reactor core. Assessments of the efficiency of these improvements are preceded by numerical

simulations of the processes in the core, in particular heat generation and sink, with account for the difference between the study object and the standard version tested in operational practice.

The authors of the article propose a method for calculating the temperature field in the core of a heterogeneous reactor (using the example of a pressurized water reactor), which makes it possible to quickly assess the level of temperature safety of various changes in the core and has the necessary speed for analyzing transients in real time.

This method is based on the energy equation for an equivalent homogeneous core in the form of a heat equation that takes into account the main features of the simulated heterogeneous structure.

The procedure for recovering the temperature field of a heterogeneous reactor uses the analytical relation obtained in this work for the heat sink function, taking into account inter-fuel element heat leakage losses. Calculations of temperature fields in the model of the PWR type reactor [7] were carried out in stationary and transient operating modes. The calculation results were compared with the results of CFD simulation. Mutual coincidence of the temperature fields in fuel elements in the transient process was obtained. The area of competing use of the temperature field recovery method was indicated.

Key words: temperature field, reactor core, thermal conductivity equation, heat sink function, fuel element, real time.

REFERENCES

1. Bojko V.I., Demyanyuk D.S., Koshelev F.P., Meshheryakov V.N., Shamanin I.V., Shidlovskij V.V. *Advanced Nuclear Fuel Cycles and New Generation Reactors*. Tomsk. TPU Publ., 2005, pp. 5-60 (in Russian).
2. Emel'yanov I.Ya., Mihan V.I., Solonin V.I., Demeshhev R.S., Rekshnya N.F. *Nuclear Reactor Design*. Moscow. Energoizdat Publ., 1982, pp. 56-76 (in Russian).
3. Baklushin R.P. *NPP Operation. Part 1. NPP Operation in Power Systems*. Moscow. NIYaU MIFI Publ., 2011, pp. 121-134 (in Russian).
4. *Nuclear Technology Review 2019*. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2019, pp. 1-3 (in Russian).
5. Bays S., Abou Jaoude A., Borlordan G. *Reactor Fundamentals Handbook*. Idaho Falls. Idaho National Laboratory, 2019. pp. 22-31; DOI: <https://doi.org/10.2172/1615634>.
6. Klimov A.N. *Nuclear Physics and Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2002. pp. 429-435 (in Russian).
7. *The Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Plant*. Pittsburgh. Westinghouse Electric Corporation, 1984, pp. 15-18.
8. Kuzevanov V.S., Zakozhurnikov S.S., Zakozhurnikova G.S., Garyaev A.B. The Process Model and the Calculation of the Temperature Field in the Resistance Furnace for the Production of the Silicone Carbide. *Vestnik IGUE*. 2017, no. 420, pp. 21-29; DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2017.4.021-029> (in Russian).
9. Kuzevanov V.S., Podgorny S.K. Temperature Field in the Active Zone of a Gas-Cooled Reactor in Transient Conditions under Different Mass Flow Profiling Conditions. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 3, p. 55; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.3.05> (in Russian).
10. Kuzevanov V.S., Podgorny S.K. *Gas-Cooled Reactors. Profiling and Intensification of Heat Transfer*. Kishinev. Palmarium Academic Publ., 2019, 84 p. (in Russian).
11. Petuhov B.S., Kirillov V.V. On the Issue of Heat Transfer in Turbulent Flow of Fluid in Pipes. *Teploehnergetika*. 1958, no. 4, pp. 29-31 (in Russian).
12. Kuzevanov V.S., Podgorny S.K. Shaping of a Gas-Cooled Reactor Core using Heat Exchange Intensifiers. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 4, pp. 31-42; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.4.03> (in Russian).

13. ANSYS Fluent. User's Guide. Canonsburg. ANSYS Inc, 2016, pp. 238-247.
14. ANSYS Fluent. Customization Manual. Canonsburg. ANSYS Inc, 2016, pp. 91-100.
15. ANSYS Fluent. Theory Guide. Canonsburg. ANSYS Inc, 2016, pp. 137-177.
16. Shaw C.T. Using Computational Fluid Dynamics. New Jersey. Prentice Hall, 1992, pp. 100-137.
17. Anderson J., Dick E., Dergez G., Grundmann R., Degroote J., Vierendeels J. Computational Fluid Dynamics: An introduction. Berlin. Springer-Verlag, 2009, pp. 10-17.
18. Petrilà T., Trif D. Basics of Fluid Mechanics and Introduction to Computational Fluid Dynamics. Boston. Springer, 2005, pp. 197-239.
19. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model. New Jersey. Wiley, 1994, pp. 51-62.
20. Podgorny S.K., Kuzevanov V.S. Temperature Field in Pressurized Water Reactor with Uncased Fuel Assemblies. Proc. of the XI International Scientific Conference «The Latest Research in Modern Science: Experience, Traditions and Innovations». Morrisville, North Carolina, USA, 7-8 July, 2020, pp. 20-31.

Authors

Kuzevanov Vyacheslav Semyonovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)
E-mail: vyacheslavkuzevanov@gmail.com

Podgorny Sergey Konstantinovich, Labor Protection Specialist, Master of Science
E-mail: serkonpod@gmail.com