

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОФИЛИРОВАНИЯ МАССОВОГО РАСХОДА

В.С. Кузеванов, С.К. Подгорный*

филиал МЭИ в г. Волжском

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

** ПО «Левобережные электрические сети» – филиал ПАО «МРСК ЮГА» - Волгоградэнерго 404122, Волгоградская обл., г. Волжский, ул. Автодорога, 10*

Р

Положительный эффект профилирования активной зоны газоохлаждаемого ядерного реактора проекта «ГТ-МГР» исследован в работах [1 – 3]. В дополнение к проведенному анализу стационарных режимов возникает необходимость в исследовании влияния профилирования на температурное поле в переходных режимах работы активной зоны.

Работа посвящена исследованию протекания переходных процессов в активной зоне газоохлаждаемого ядерного реактора с разными принципами профилирования массового расхода теплоносителя.

Исследование переходных процессов в активной зоне является сложной задачей, решение которой на базе прямых экспериментов недоступно авторам. Кроме того, численное моделирование на основе современных CFD-программных комплексов [4 – 10] является весьма затратным по используемым вычислительным ресурсам.

Для быстрого решения задач подобного рода разработан алгоритм расчета температурного поля с применением модели, в которой активная зона рассматривается как твердая среда с газовыми полостями и принято допущение, что перенос тепла за счет молекулярной теплопроводности может быть описан уравнением теплопроводности для сплошной среды с теплофизическими параметрами, эквивалентными соответствующим параметрам пористого объекта.

На основе разработанного алгоритма создана программа расчета температурного поля в газоохлаждаемом реакторе в переходных режимах. Программа верифицирована путем сравнения результатов многочисленных расчетов с CFD-моделированием соответствующих переходных процессов в объекте, имитирующем активную зону газоохлаждаемого ядерного реактора. Преимуществом программы является возможность расчета изменения состояния газоохлаждаемых активных зон сложной конфигурации с каналами разных диаметров в режиме реального времени. Это позволяет использовать программу при расчетах переходных процессов в контурах ЯЭУ в целом, в частности, при создании тренажеров.

Приведены расчеты переходных процессов для активной зоны, имитирую-

щей зону высокотемпературного газоохлаждаемого реактора ЯЭУ проекта «ГТ-МГР», при разных условиях профилирования массового расхода теплоносителя. Результаты расчетов однозначно указывают на значительное отличие температурных режимов профилированной и непрофилированной активных зон в переходных процессах и несомненное повышение надежности ЯЭУ [11 – 13] с профилированным в активной зоне массовым расходом теплоносителя в целом.

Ключевые слова: профилирование активной зоны, переходные процессы, температурное поле, пористое тело, уравнение теплопроводности, сток тепла.

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1 – 3] подробно исследовано распределение расходных и термических параметров теплоносителя в охлаждающих каналах высокотемпературного реактора с гелиевым теплоносителем. Сделан анализ вариантов разных принципов профилирования по условию одинаковых

- массовых расходов охлаждающего теплоносителя в параллельных каналах;
- подогревов теплоносителя в каналах;
- максимальных температур стенок охлаждающих каналов.

Рассматривалась работа реактора на номинальной мощности в стационарном режиме.

При наличии возмущающего воздействия при изменении ядерно-физических параметров (нейтронного поля) либо параметров теплоносителя (расхода, температуры на входе в активную зону) возникает переходный процесс с установлением нового поля температуры в активной зоне реактора. Работа посвящена исследованию влияния профилирования массового расхода теплоносителя на изменение температуры в активной зоне реактора в переходных процессах.

Сформулированы физическая и математическая модели переходных процессов в газоохлаждаемом реакторе, а также приведены результаты расчетов и их сравнение с результатами CFD-моделирования на примере активной зоны реактора ЯЭУ «ГТ-МГР».

ОБЩАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Ядерный реактор ЯЭУ проекта «ГТ-МГР» [14 – 18] является корпусным графито-газовым высокотемпературным реактором с гелиевым теплоносителем с тепловой мощностью активной зоны 600 МВт. Активная зона имеет кольцевую форму и состоит из ТВС, выполненных из графита в виде перфорированных призматических шестигранных блоков. Используются ТВС трех видов: топливные, управляющие и аварийного останова. Топливо выполнено в виде шаровых твэлов, которые упакованы в топливные каналы диаметром 12.7 мм. Охлаждающие каналы представлены двумя группами: 9984 канала диаметром 15.88 мм и 642 канала диаметром 12.7 мм. Массовый расход гелия через активную зону в номинальном режиме $G_0 = 320$ кг/с, температура теплоносителя на входе в активную зону $T_{вх} = 491^\circ\text{C}$.

В модельном представлении активная зона рассматривается как твердая среда (индекс «1») с газовыми полостями (индекс «2»). Твердая составляющая многокомпонентная – топливо, графит, металл, газовая составляющая однокомпонентная – гелий.

Предполагается, что перенос тепла за счет молекулярной теплопроводности мо-

жет быть описан как для сплошной среды с теплофизическими параметрами, эквивалентными соответствующим параметрам пористого объекта.

В модели учитывается

- теплопроводность при переменной плотности ρ и переменном коэффициенте теплопроводности λ составляющих активной зоны;
- тепло ядерных реакций как распределенные внутренние источники тепла q_v ;
- тепло, снимаемое с поверхности охлаждения теплоносителем, как внутренние стоки тепла $q_{v,t}$.

Допущения:

- усредненная температура T в расчетной области (ячейке) определена состоянием эквивалентной сплошной среды;
- температуры твердой и газовой составляющих различаются, но однозначно связаны с расчетной средней температурой эквивалентной сплошной среды;
- изменением усредненных параметров сплошной среды в тангенциальном направлении можно пренебречь; активная зона при этом представлена в двумерном приближении;
- средняя пористость $\langle \varepsilon \rangle$ эквивалентной сплошной среды в объеме активной зоны равна отношению объема газовой составляющей V_2 к общему объему V активной зоны;
- локальная пористость ε есть функция координаты;
- изменением пористости из-за температурных эффектов можно пренебречь;
- состояние газовой составляющей описывается уравнением для идеальных газов;
- перепады давления P в системе малы – при расчете теплофизических параметров газа процесс при его течении можно считать изобарным.

Базовые элементы модели переноса тепла:

- уравнение теплопроводности в системе с переменными теплофизическими параметрами является основным уравнением баланса энергии;
- перемещение (течение) газовой составляющей учитывается как перенос тепла, представляемый в виде источников (стоков) члена уравнения теплопроводности;
- вследствие значительной тепловой инерционности твердой составляющей изменение параметров газовой составляющей рассчитывается в квазистационарном приближении.

Таким образом, совокупный тепломассоперенос в активной зоне ядерного реактора представлен в модели как суперпозиция нестационарного процесса теплопроводности в эквивалентной сплошной среде и квазистационарного процесса переноса (удаления) тепла изменяющимся потоком газа.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Запишем для активной зоны реактора, представленной как сплошная среда с внутренними источниками и стоками тепла и переменными теплофизическими свойствами, уравнение теплопроводности в виде [19]

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) = \nabla(\lambda_{\text{эф}} \nabla T) + q_v - q_{v,t}, \quad (1)$$

где T – температура, К; $\rho h = \rho_1 h_1(1 - \varepsilon) + \rho_2 h_2 \varepsilon$; h_1, h_2 – энтальпии твердой и газовой составляющих соответственно, Дж/К; ρ_1 – плотность многокомпонентной твердой составляющей, кг/м³; ρ_2 – плотность гелия, кг/м³; τ – время, с; $q_v, q_{v,t}$ – мощности внутренних источников и стоков тепла на единицу объема активной зоны соответственно, Вт/м³; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности для эк-

вивалентной среды, Вт/(м·К) (определение $\lambda_{эф}$ соответствует модели, предложенной в [19]).

После преобразования левой части уравнения (1) получаем

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) = \Phi \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad \Phi = (1 - \varepsilon) \left[c_1 \rho_1 + h_1 \frac{\partial \rho_1}{\partial T_1} \right] + \left[c_{p,2} \rho_2 + h_2 \frac{\partial \rho_2}{\partial T_2} \right],$$

причем составляющая $c_{p,2} \rho_2 + h_2 \cdot \partial \rho_2 / \partial T_2 = 0$ в случае нулевого значения h_2 в точке $T = 0$ К; c_1 – средняя удельная теплоемкость многокомпонентной твердой составляющей в исследуемой области температур, Дж/(кг·К); $c_{p,2}$ – изобарная удельная теплоемкость гелия ($c_{p,2} = \text{const}$), Дж/(кг·К).

Дифференциальное уравнение

$$\Phi \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda_{эф} \nabla T) + q_v - q_{v,t} \quad (2)$$

описывает гетерогенную активную зону реактора, охлаждаемого газовым теплоносителем, как эквивалентную активную зону с распределенными твердой и газовой составляющими, не имеющую внутренних границ, и в объеме которой находятся источники и стоки тепла.

Естественно, функция $q_{v,t}$ должна отражать особенности энергобаланса твердой и газообразной составляющих активной зоны. Определим далее эту функцию, связав с плотностью теплового потока на стенке охлаждающего канала и особенностями гетерогенной структуры активной зоны.

Очевидно, что для расчетной ячейки « i » конечных размеров, назначенной при численном решении уравнения (2), справедливо

$$(q_{v,t})_i = \sigma_i q_{i,дr} \quad (3)$$

где $\sigma_i = F_i / V_i$; V_i , F_i – объем ячейки, м³ и площадь теплообмена, приходящаяся на него, м²; $q_{i,д}$ – плотность потока тепла на единицу поверхности, Вт/м² (дополнительный индекс «д» означает действительное значение параметра в нестационарном процессе).

Задача определения функции стока тепла сводится к задаче определения действительной плотности теплового потока на стенках охлаждающих каналов в нестационарном процессе.

В стационарном режиме $q_{д} = q_n$, где q_n относится к стационарным условиям и легко определяется по известным соотношениям с учетом, в частности, общего уравнения энергетического баланса:

$$\int_v q_v dv = \int_F q_n dF + Q_{гр}, \quad (4)$$

где F – общая площадь теплообмена в активной зоне реактора, м²; $Q_{гр}$ – общий поток тепла на внешней границе активной зоны, Вт.

В переходном процессе $q_{д} \neq q_n$.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ СТОКА ТЕПЛА В ПЕРЕХОДНОМ ПРОЦЕССЕ

Запишем для произвольного охлаждающего канала активной зоны уравнение связи средней по сечению потока температуры теплоносителя $T_{2,д}$ с нормальной плотностью потока тепла на стенке канала $q_{д}$:

$$T_{2,д} = T_2^{вх} + \frac{1}{G \cdot c_{p,2}} \int_{\delta}^z \pi dq_{д} dz, \quad (5)$$

где G – массовый расход теплоносителя, кг/с; $G \neq G(z)$ в квазистационарном приближении; d – диаметр канала, м; индекс «вх» указывает на значение параметра на входе в канал; z – аксиальная координата, м; δ – эффективная добавка, м.

Согласно принятым допущениям, всегда выполняется равенство

$$q_d = \alpha(T_{ст.д} - T_{2,д}), \quad (6)$$

где α – средний по длине канала коэффициент теплоотдачи при течении газового теплоносителя в круглом канале диаметром d при массовом расходе теплоносителя G , Вт/(м²·К); $T_{ст.д}$ – действительное среднее по периметру канала значение температуры стенки канала в соответствующей координате z поперечного сечения канала.

Из уравнения (5) с учетом соотношения (6) следует дифференциальное уравнение для определения q_d :

$$\frac{dq_d}{dz} + a_1 \cdot q_d = \alpha \frac{dT_{ст.д}}{dz}, \quad (7)$$

$a_1 = \pi d \alpha / G c_{p,2}$ – параметр, неизменный по длине данного канала согласно принятым допущениям.

Решением уравнения (7) является функция вида

$$q_d = e^{-a_1 z} \left[\alpha \int \left(\frac{dT_{ст.д}}{dz} \right) e^{a_1 z} dz + a_2 \right], \quad (8)$$

где a_2 – постоянная интегрирования, определяемая условиями входа теплоносителя в активную зону.

Для определения q_d по соотношению (8), отражающему связь с температурой стенки канала $T_{ст.д}$, необходимо знать функциональную зависимость этой температуры от координаты и времени.

В рамках предлагаемой модели принято допущение о справедливости соотношения

$$(T_{ст.д} - T_{ст.0}) / (T_{ст.1} - T_{ст.0}) = f_\tau. \quad (9)$$

Здесь индекс «0» относится к стационарному (исходному) режиму работы активной зоны реактора до появления возмущения (изменения) параметров, влияющих на температурный режим; $T_{ст.1}$ – средняя по периметру температура стенки канала в новом стационарном режиме с измененными параметрами, повлиявшими на температурный режим; f_τ – функция времени и радиальной координаты, независимая от координаты z .

Допущение (9) принято исходя из следующих соображений. Во-первых, структура активной зоны вдоль любого охлаждающего канала (по аксиальной координате z) не меняется. Во-вторых, используется квазистационарное приближение, когда отсутствует запаздывание возмущающего фактора по расходу и коэффициенту теплоотдачи по направлению движения теплоносителя.

Решение уравнения (8) с учетом соотношения (9) позволяет найти вид функции $q_d = q_d(z, \tau)$ при любом скачкообразном возмущающем воздействии.

Включим в перечень возмущающих параметров, влияющих на температурный режим активной зоны, q , G , α , $T_2^{вх}$. Обозначим отношения новых стационарных значений этих параметров к исходным как

$$k_q = q_1/q_0; \quad k_\alpha = \alpha_1/\alpha_0; \quad k_G = G_1/G_0; \quad k_T = T_{2,1}^{вх}/T_{2,0}^{вх}. \quad (10)$$

Из соотношения (9) следует

$$T_{\text{ст.д}} = T_{\text{ст.0}} + (T_{\text{ст.1}} - T_{\text{ст.0}}) f_{\tau}. \quad (11)$$

Учтем, что стационарные значения $T_{\text{ст.0}}$ и $T_{\text{ст.1}}$ определяются как

$$\begin{aligned} T_{\text{ст.0}} &= T_{2.0}^{\text{вх}} + \frac{q_0}{\alpha_0} + \Phi_0(z), \\ T_{\text{ст.1}} &= k_T T_{2.0}^{\text{вх}} + \frac{k_q}{k_\alpha} \frac{q_0}{\alpha_0} + \frac{k_q}{k_G} \Phi_0(z), \\ \Phi_0(z) &= \frac{\pi d}{G_0 c_{p,2} \delta} \int_0^z q_0 dz. \end{aligned} \quad (12)$$

Примем «косинусоидальное» энерговыделение по высоте активной зоны. При назначении начала координат на расстоянии δ от входа в активную зону будем иметь следующий вид функции $q_0(z)$ для стационарного режима:

$$q_0(z) = q_0^{\text{max}} \sin(\pi z / H_3), \quad (13)$$

где q_0^{max} – плотность потока тепла на стенке канала в середине канала по его высоте в исходном стационарном процессе; $H_3 = H + 2\delta$; H – высота активной зоны, м.

Заметим, что при изменяющейся по поперечному сечению активной зоны плотности энерговыделения плотность потока тепла q_0 в стационарном процессе есть функция двух координат:

$$q_0 = q_0(z, r) = q_0^{\text{max}}(r) \sin(\pi z / H_3).$$

Интегрируем первое слагаемое в фигурных скобках уравнения (8) и определяем постоянную интегрирования a_2 из условия выполнения на входе теплоносителя в активную зону равенства

$$q_0(\delta, r) = \alpha_0 [T_{\text{ст.0}}(\delta, r) - T_{2.0}^{\text{вх}}]. \quad (14)$$

После несложных преобразований получаем следующий вид функции $q_{\text{д}}(z, r, \tau)$:

$$q_{\text{д}}(z, r, \tau) = q_0(z, r) \cdot \tilde{f} + \tilde{P}, \quad (15)$$

где

$$\tilde{f} = A(1 - f_\tau)(k_\alpha - k_G) \left[\frac{\pi}{H_3} \text{ctg} \left(\pi \frac{z}{H_3} \right) - a_1 \right] + (1 - f_\tau)k_\alpha + f_\tau k_q, \quad (16)$$

$$\tilde{P} = [k_\alpha \alpha_0 (1 - f_\tau) (1 - k_T) T_{2.0}^{\text{вх}} - \psi] \cdot \exp[-a_1(z - \delta)].$$

В свою очередь,

$$a_1 = \frac{k_\alpha}{k_G} \frac{\pi d}{G_0 c_{p,2}} \alpha_0; \quad A = \frac{a_1}{a_1^2 + (\pi / H_3)^2};$$

$$\begin{aligned} \psi = \psi(\delta, r, \tau) &= q_0(\delta, r) [A(1 - f_\tau)(k_\alpha - k_G)] \times \\ &\times \left[\frac{\pi}{H_3} \text{ctg} \left(\pi \frac{\delta}{H_3} \right) - a_1 \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Теперь легко записать выражение для определения функции стока тепла в переходном процессе для расчетной ячейки i , содержащей произвольное количество каналов разного диаметра:

$$(q_{v,t})_i = \sum_{j=1}^n \sigma_{i,j} (q_{j,\text{д}})_i, \quad (18)$$

где n – число каналов, входящих в расчетную ячейку активной зоны; $\sigma_{ij} = F_{ij}/V_i$; F_{ij} – теплообменная поверхность единичного канала j , принадлежащая расчетной ячейке i ; V_i – полный объем расчетной ячейки.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ f_τ

По физическому смыслу функция f_τ отражает локальную тепловую инерционность активной зоны.

Полагаем, что функция f_τ в общем случае не может быть выражена аналитически и определим ее в произвольной точке как

$$f_\tau = (T - T_0) / (T_1 - T_0), \quad (19)$$

где T – решение уравнения теплопроводности в переходном процессе; T_0, T_1 – соответствующие решения стационарного уравнения

$$\nabla(\lambda_{эф}\nabla T) + q_v - q_{v,t} = 0 \quad (20)$$

при граничных условиях, тождественных исходному (индекс «0») и новому (индекс «1») режимам.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Численное решение уравнения (2) дает значение средних температур эквивалентной сплошной среды в расчетных ячейках. По ходу решения в каждой ячейке определяются средние по объему газовой составляющей температуры теплоносителя во всех охлаждающих каналах или их частей, входящих в состав ячейки, а также средние по периметрам каналов температуры стенок. С целью получения полной картины о температурном режиме активной зоны как в стационарных, так и в переходных процессах дополнительно определяются значения локальных максимальных температур T^{\max} в каждой ячейке. Расчетные соотношения для ячейки i , содержащей канал j , имеют вид

$$T_{ij}^{\max} = (T_{ст})_{ij} + \Delta T_{ij}^{\max}, \quad \Delta T_{ij}^{\max} = b_j \{q_v / [(1 - \epsilon)\lambda_1]\}_{ij}, \quad (21)$$

где b_j для канала с диаметром d_j есть константа:

$$b_j = (d_3/4)^2 [2\ln(d_3/d_j) + (d_j/d_3)^2 - 1]. \quad (22)$$

При этом значение d_3 как диаметра условной изолированной области с охлаждающим каналом d_j в центре определено зависимостью

$$d_3 = [4S/(\pi N)]^{1/2}, \quad (23)$$

где S – общая площадь поперечного сечения активной зоны, м²; N – общее число всех охлаждающих каналов в активной зоне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Проведены следующие численные эксперименты на объекте, имитирующем активную зону газоохлаждаемого ядерного реактора проекта ЯЭУ «ГТ-МГР».

CFD-моделирование активной зоны требует значительной вычислительной мощности, которой авторы работы не располагают. По этой причине сравнение расчета переходных процессов по авторским методике и алгоритму с численным CFD-моделированием нестационарного процесса, возникающего после нанесения возмущения, производилось с использованием фрагмента активной зоны (рис. 1). Как при авторском расчете, так и при CFD-моделировании использовались граничные условия II рода, соответствующие теплоизолированному фрагменту активной зоны.

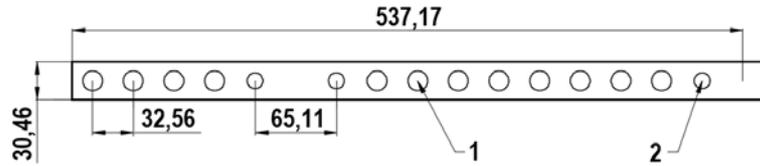


Рис. 1. Фрагмент активной зоны: 1 – каналы диаметром 15.88 мм; 2 – каналы диаметром 12.7 мм. Размеры указаны в мм; вследствие зеркальной симметрии фрагмента на рисунке изображена его половина, общая длина фрагмента 1074.34 мм; высота фрагмента равна высоте активной зоны 7930 мм

Рисунки 2, 3 демонстрируют качественное и количественное соответствие расчетных значений температуры полученным в результате CFD-моделирования для рассмотренных вариантов профилирования фрагмента активной зоны и возмущающих воздействий. Отклонение значений температуры, рассчитанной по предлагаемой модели, от значений, полученных при моделировании, в любом переходном процессе не превышает 23 К.

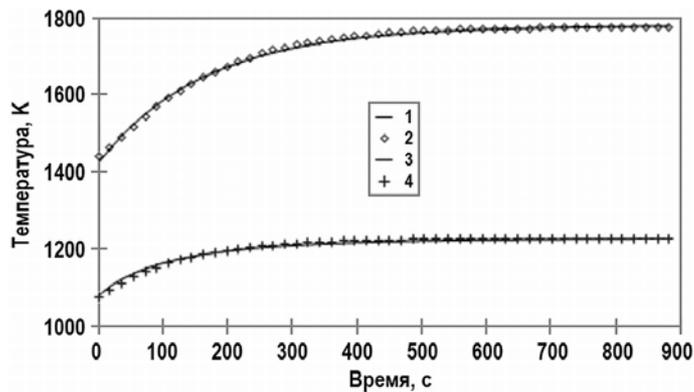


Рис. 2. Сравнение максимальной и средней температур в активной зоне с профилированием по условию одинаковых подогревов при набросе тепловой мощности на 50%: 1 – значения максимальной температуры, полученные при использовании разработанного алгоритма; 2 – значения максимальной температуры, полученные при CFD-моделировании; 3 – значения средней температуры, полученные при использовании разработанного алгоритма; 4 – значения средней температуры при CFD-моделировании

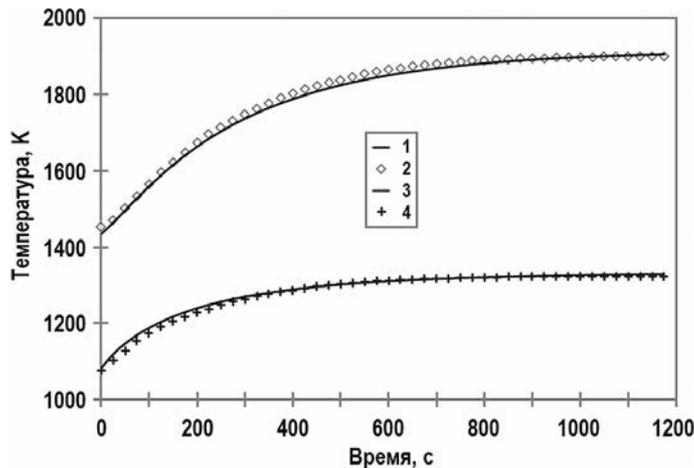


Рис. 3. Сравнение максимальной и средней температур в активной зоне с профилированием по условию одинаковых температур стенок при сбросе массового расхода теплоносителя на 50%: 1 – значения максимальной температуры, полученные при использовании разработанного алгоритма; 2 – значения максимальной температуры, полученные при CFD-моделировании; 3 – значения средней температуры, полученные при использовании разработанного алгоритма; 4 – значения средней температуры при CFD-моделировании

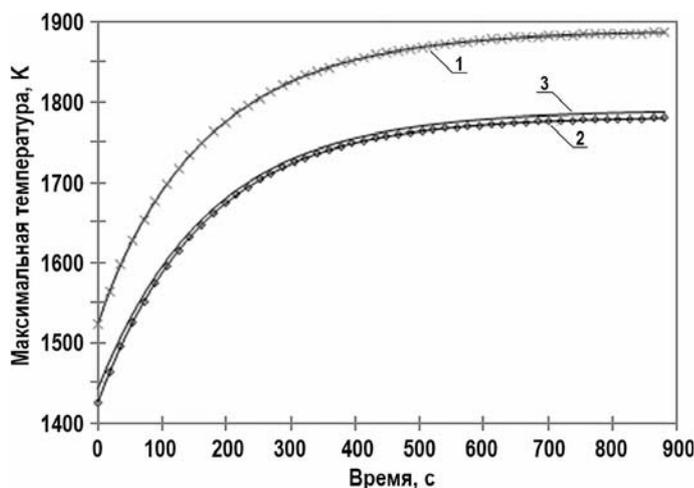


Рис. 4. Сравнение максимальной температуры в активной зоне с разными условиями профилирования при набросе тепловой мощности на 50%: 1 – максимальная температура в активной зоне без профилирования; 2 – максимальная температура в активной зоне с профилированием по условию одинаковых подогревов; 3 – максимальная температура в активной зоне с профилированием по условию одинаковых максимальных температур стенок

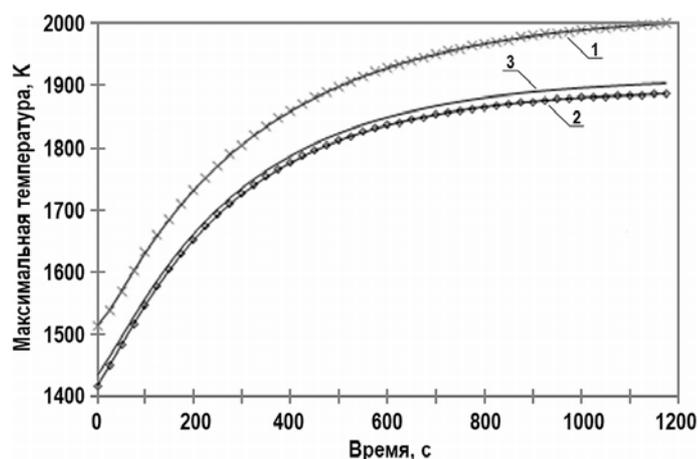


Рис. 5. Сравнение максимальной температуры в активной зоне с разными условиями профилирования при сбросе массового расхода на 50%: 1 – максимальная температура в активной зоне без профилирования; 2 – максимальная температура в активной зоне с профилированием по условию одинаковых подогревов; 3 – максимальная температура в активной зоне с профилированием по условию одинаковых максимальных температур стенок

На рисунках 4, 5 показано преимущество активной зоны с профилированием в переходном, по сути – аварийном, процессе по сравнению с активной зоной без профилирования. Действительно, температура в активной зоне без профилирования массового расхода теплоносителя растет быстрее, чем в зоне с профилированием расхода. Например, значение максимальной температуры 1700 К при набросе тепловой мощности 50% по отношению к номинальной будет достигнуто через 140 с в зоне без профилирования, а в профилированной – по условию одинаковых подогревов теплоносителя либо по условию одинаковых максимальных температур стенок охлаждающих каналов через 252 с (см. рис. 4).

Аналогично, при скачкообразном уменьшении расхода теплоносителя на 50% по отношению к номинальному расходу соответствующая разница по времени достижения максимальной температуры 1800 К составляет около 150 с (см. рис. 5).

Очевидно, что активная зона реактора ЯЭУ проекта «ГТ-МГР» с профилированием массового расхода теплоносителя надежнее активной зоны без профилирова-

ния в ситуациях, требующих определенное время для запуска мероприятий по локализации аварии.

Заметим (см. рис. 4, 5), что переходные процессы в активных зонах, профилированных по разным условиям (одинаковые подогревы теплоносителя или одинаковые максимальные температуры стенок каналов), практически совпадают. Однако стоит учесть, как отмечено в работе [2], что перепад давления в активной зоне с профилированием массового расхода теплоносителя по равенству максимальной температуры в каналах меньше, чем в зоне с традиционным профилированием по одинаковым подогревам теплоносителя в охлаждающих каналах активной зоны. В нашем случае на 11%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан алгоритм, на основе которого создана программа расчета температурного поля в газоохлаждаемом реакторе в переходных режимах. Программа расчета верифицирована путем сравнения результатов многочисленных расчетов с CFD-моделированием соответствующих переходных процессов. Преимуществом программы является возможность расчета изменения состояния газоохлаждаемых активных зон сложной конфигурации с каналами разных диаметров в режиме реального времени, что позволяет использовать ее при расчетах переходных процессов в контурах ЯЭУ в целом, в частности, при создании тренажеров.

Приведены расчеты переходных процессов для активной зоны, имитирующей зону высокотемпературного газоохлаждаемого реактора ЯЭУ проекта «ГТ-МГР», при разных условиях профилирования массового расхода теплоносителя. Результаты расчетов однозначно указывают на значительное отличие температурных режимов профилированной и непрофилированной активных зон в переходных процессах и несомненное повышение надежности ЯЭУ с профилированным в активной зоне массовым расходом теплоносителя в целом.

Литература

1. *Podgorny S.K., Kuzevanov V.S.* A method of calculation of mass flow rates and temperature of gas coolant in parallel channels of an active core of a nuclear reactor during core shaping. / Proc. of the XIII International scientific-practical conference «The Strategies of Modern Science Development 2017». – North Charleston, South Carolina, USA, 3-4 October, 2017. – PP. 27-36.
2. *Kuzevanov V.S., Podgorny S.K.* Research of the influence of intensification of heat transfer on distribution of temperature in the active core of the gas cooled nuclear reactor of the «GT-MHR» project. // Journal of Physics Conference Series. Article ID 012069. – 2017. – Vol. 891. – PP. 1-4.
3. *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.
4. *ANSYS Fluent User's Guide.* – Canonsburg: ANSYS, inc, 2016. – PP. 238-247.
5. *ANSYS Fluent. Customization Manual.* – Canonsburg: ANSYS, inc, 2016. – PP. 91-100.
6. *ANSYS Fluent. Theory Guide.* – Canonsburg: ANSYS, inc, 2016. – PP. 137-177.
7. *Shaw C.T.* Using Computational Fluid Dynamics. – New Jersey: Prentice Hall, 1992. – PP. 100-137.
8. *Anderson J., Dick E., Dergez G., Grundmann R., Degroote J., Vierendeels J.* Computational Fluid Dynamics: An introduction. – Berlin: Springer-Verlag, 2009. – PP. 10-17.
9. *Petrila T., Trif D.* Basics of fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics. – Boston: Springer, 2005. – PP. 197-239.

10. *Mohammadi B., Pironneau O.* Analysis of the K-epsilon turbulence model. – New Jersey: Wiley, 1994. – PP. 51-62.
11. *Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants. Safety Guide No. NS-G-1.12.* – Vienna: International atomic energy agency, 2005. – PP. 3-8.
12. *International Safeguards in the Design of Nuclear Reactors. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.9* – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. – PP. 18-23.
13. *Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific safety requirements No. SSR-2/1 (Rev.1)* – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. – PP. 4-10.
14. *GT-MHR Conceptual Design Description Report. NRC Project No. 716* – San Diego: General Atomics, 2002. – PP. 58-62.
15. *Vasyaev A., Kodochigov N., Kuzavkov N., Kuznetsov L.* International Project GT-MHR – New Generation of Nuclear Reactors. The International Conference of Bulgarian Nuclear Society 2001. – Varna, Bulgaria, June 17-20, 2001. – PP. 7-21.
16. *Neylan A.J., Shenoy A., Silady F.A., and Dunn T.D.* GT-MHR Design, Performance and Safety. – San Diego: General Atomics, 1994. – PP. 2-8.
17. *Engle G.B.* Assessment of Grade H-451 Graphite for Replaceable Fuel and Reflector Elements in HTGR. – San Francisco: General Atomics, 1977. – PP. 29-56.
18. *Engle G.B. Johnson W.R.* Properties of Unirradiated Fuel Element Graphites H-451 and S0818. – San Francisco: General Atomics, 1976. – PP. 6-20.
19. *Кузеванов В.С., Закожурников С.С., Закожурникова Г.С., Гаряев А.Б.* Модели процессов и расчет температурного поля в печи сопротивления для производства карбида кремния. // Вестник ИГУЭ. – 2017. – № 420. – С. 21-29.

Поступила в редакцию 30.01.2019 г.

Авторы

Кузеванов Вячеслав Семенович, профессор, д-р техн. наук

E-mail: kuzevanov@vfmei.ru

Подгорный Сергей Константинович, магистр

E-mail: serkonpod@gmail.com

UDC 621.039.51

TEMPERATURE FIELD IN GAS-COOLED REACTOR CORE IN TRANSIENT CONDITIONS UNDER DIFFERENT PRINCIPLES OF MASS FLOW PROFILING

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

Branch of MPEI in Volzhsky,

69 Lenina st., Volzhsky, Volgograd reg., 404110 Russia

* Branch of IDGC of the South, PJSC – Volgogradenergo

10 Avtodoroga st., Volzhsky, Volgograd reg., 404122 Russia

ABSTRACT

Positive effect of profiling the gas-cooled reactor core within the framework of the GT-MHR project was investigated in [1 – 3]. The necessity arises to supplement already implemented analysis of equilibrium conditions of core operation with investigation of effects of profiling on the temperature field in transient modes of reactor core operation.

The present paper is dedicated to the investigation of development of transients in gas-cooled nuclear reactor core subject to the implementation of different principles of core profiling.

Investigation of transients in reactor core represents complex problem solution of which by conducting direct measurements is beyond the reach of the authors. Besides the above, numerical simulation based on advanced CFD software complexes [4 – 10] is also fairly demanding in terms of required computer resources.

The algorithm for calculating temperature fields using the model where the reactor core is represented as the solid medium with gas voids and the assumption is made that heat transfer due to molecular heat conductivity can be described by thermal conductivity equation written for continuous medium with thermal physics parameters equivalent to respective parameters of porous object was developed by the authors in order to get the possibility of obtaining prompt solutions of this type of problems.

Computer code for calculating temperature field in gas-cooled reactor in transient operation modes was developed based on the developed algorithm. Proprietary computation code was verified by comparing the results of numerous calculations with CFD modeling of respective transients in the object imitating the core of gas-cooled nuclear reactor. The advantage of the developed computer code is the possibility of variation of real-time evolution of conditions in complex configurations of gas-cooled reactor cores with different channel diameters. This allows using the computer code in the calculations of transients in loops of reactor facility as a whole, in particular in developing simulators.

Results are provided of calculations of transients for reactor core imitating the core of gas-cooled nuclear reactor of GT-MHR project performed for different approaches to profiling coolant mass flow. Results of calculations unambiguously indicate the significant difference of temperature regimes during transients in the reactor core with and without profiling and undeniable enhancement of reliability of nuclear reactor [11 – 13] with profiling of coolant mass flow in the reactor core as a whole.

Key words: reactor core profiling, transient conditions, temperature field, porous body, thermal conductivity equation, heat sink.

REFERENCES

1. Podgorny S. K., Kuzevanov V. S. A method of calculation of mass flow rates and temperature of gas coolant in parallel channels of an active core of a nuclear reactor during core shaping. *Proc. of the XIII International scientific-practical conference «The Strategies of Modern Science Development 2017»*. North Charleston, South Carolina, USA, 3-4 October, 2017, pp. 27-36.
2. Kuzevanov V. S., Podgorny S. K. Research of the influence of intensification of heat transfer on distribution of temperature in the active core of the gas cooled nuclear reactor of the «GT-MHR» project. *Journal of Physics Conference Series*. 2017, v. 891, pp. 1-4.
3. 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 (in Russian).
4. *ANSYS Fluent User's Guide*. Canonsburg. ANSYS, inc, 2016, pp. 238-247.
5. *ANSYS Fluent. Customization Manual*. Canonsburg. ANSYS, inc, 2016, pp. 91-100.
6. *ANSYS Fluent. Theory Guide*. Canonsburg. ANSYS, inc, 2016, pp. 137-177.
7. Shaw C. T. *Using Computational Fluid Dynamics*. New Jersey. Prentice Hall, 1992, pp. 100-137.
8. Anderson J., Dick E., Dergez G., Grundmann R., Degroote J., Vierendeels J. *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*. Berlin, Springer-Verlag, 2009, pp. 10-17.
9. Petrilă T., Trif D. *Basics of Fluid Mechanics and Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Boston. Springer, 2005, pp. 197-239.

10. Mohammadi B., Pironneau O. *Analysis of the K-epsilon Turbulence Model*. New Jersey. Wiley, 1994, pp. 51-62.
11. *Design of the Reactor Core for Nuclear Power Plants. Safety Guide No. NS-G-1.12*. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2005, pp. 3-8.
12. *International Safeguards in the Design of Nuclear Reactors. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.9*. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2014, pp. 18-23.
13. *Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific safety requirements No. SSR-2/1 (Rev.1)*. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2014, pp. 4-10.
14. *GT-MHR Conceptual Design Description Report. NRC project No. 716*. San Diego. General Atomics, 2002, pp. 58-62.
15. Vasyaev A., Kodozhigov N., Kuzavkov N., Kuznetsov L. International Project GT-MHR - New Generation of Nuclear Reactors, The International Conference of Bulgarian Nuclear Society 2001. Varna, Bulgaria. June 17-20, 2001, pp. 7-21.
16. Neylan A.J., Shenoy A., Silady F.A., and Dunn T.D. *GT-MHR Design, Performance and Safety*. San Diego. General Atomics, 1994, pp. 2-8.
17. Engle G.B. *Assessment of grade H-451 graphite for replaceable fuel and reflector elements in HTGR*. San Francisco. General Atomics, 1977, pp. 29-56.
18. G.B. Engle, Johnson W.R. *Properties of Unirradiated Fuel Element Graphites H-451 and S0818*. San Francisco. General Atomics, 1976, pp. 6-20.
19. 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 (in Russian).

Authors

Kuzevanov Vyacheslav Semenovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: kuzevanov@vfmei.ru.

Podgorny Sergey Konstantinovich, Master of Science

E-mail: serkonpod@gmail.com