

## Анализ и кросс-валидация стационарных термогидравлических характеристик топливного элемента активной зоны реактора ВВЭР-1200

Р.Ф. Сиро,<sup>\*</sup> А.С. Зевякин<sup>†</sup>

Кафедра ядерной физики и технологий,  
Национальный исследовательский ядерный университет «НИЯУ МИФИ»  
Обнинск 249039, Россия

(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 15.10.2024)

Ядерный тепловыделяющий элемент изготавливается из материалов, которые не только способны выдерживать экстремальные тепловые нагрузки, но и эффективно участвуют в передаче тепла от топлива к теплоносителю. Несмотря на низкую теплопроводность газов по сравнению с твердыми телами, в топливном элементе необходимо предусмотреть газовый зазор, чтобы создать пространство для накопления продуктов деления. В данном случае мы должны рассмотреть инертный газ, способный передавать тепло. Поэтому термогидравлический анализ становится обязательной процедурой для проверки возможного нарушения установленных критических и предельно допустимых параметров, связанных с материалами топливного элемента. Для проверки безопасности стержневой ячейки активной зоны реактора ВВЭР-1200 было изучено поведение теплопередачи от топлива к теплоносителю первого контура путем решения уравнения теплопроводности в стационарном виде аналитическими и численными методами. В расчетных схемах распределение температуры в стержневой ячейке было определено путем вычисления перепада температуры вдоль радиального профиля в предположении стационарных условий. Результаты показали, что конструкция стержневой ячейки активной зоны реактора ВВЭР-1200 демонстрирует операции, которые не нарушают установленные допустимые параметры, связанные с используемыми материалами.

PACS: 44.05.+e, 44.10.+i, 44.40.+a, 89.20.Kk, 28.52.Fa, 05.70.-a

УДК: 536.2, 536.3, 536.4, 536.7, 53.023

Ключевые слова: ВВЭР-1200, термогидравлический анализ, теплопроводность, ядерный реактор, теплофизические параметры, численное решение, аналитическое решение.

### ВВЕДЕНИЕ

В то время как усовершенствованные характеристики реактора ВВЭР-1200 обещают повышение безопасности и производительности, сложность динамики его активной зоны требует детального изучения поведения связанной с этим термогидравлической системы на уровне стержневых элементов активной зоны реактора. Это исследование представляет собой углубленный анализ термогидравлической работы стержневого элемента активной зоны реактора в стационарных условиях. Результаты анализа позволяют получить информацию, которая имеет решающее значение для оптимизации производительности реактора, совершенствования протоколов безопасности и даже совершенствования стратегий управления топливом. Используя как аналитические, так и численные методы, исследование направлено на то, чтобы установить ориентир в понимании процесса теплопередачи в активной зоне реактора ВВЭР-1200. Аспект перекрестной проверки особенно важен, поскольку он обеспечивает надежность и применимость результатов в различных условиях эксплуатации даже при отсутствии экспериментальных данных. Это исследование не только расширяет знания о технологии ВВЭР-1200, но и прокладывает путь для будущих достижений в области проектирования, безопасности и эксплуатации ядерных реакторов.

Целью данной научной работы является исследование теплопередачи от топлива к теплоносителю первого контура активной зоны реактора ВВЭР-1200 путем решения уравнения теплопроводности аналитическими и численными методами.

Уравнение теплопроводности, полученное в данной научной работе, имеет стационарный характер [1]. Из основных законов теплопередачи [2], мы получаем уравнение энергетического баланса, описывающее подвод тепла, температуру и теплопередачу. Из уравнения (1) выводятся уравнения удельной теплопроводности материала.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p \cdot T(r, t)) = q_v(r, t) + \nabla \cdot k \nabla T(r, t) \approx q_v(r, t) + k \nabla^2 T(r, t), \quad (1)$$

где  $q_v$  — объемная скорость тепловыделения,  $k(T)$  — теплопроводность, зависящая от температуры,  $\rho$  — физическая плотность материала, а  $C_p$  — изобарная удельная теплоемкость. Уравнение (1) выведено на основе закона теплопроводности Фурье [3].

### 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ШТЫРЕВОЙ ЯЧЕЙКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1200

В этом исследовании предполагается, что тепловой поток равномерно распределяется по всем стержневым элементам активной зоны реактора, поэтому в анализе используется один стержневой элемент, содержащий

\* sr008@campus.mephi.ru

† alexzev1991@mail.ru

топливо  $UO_2$ . На рис. 1 показан вид сверху 3D-модели контактной ячейки активной зоны реактора, принятой для численного решения уравнения теплопроводности.

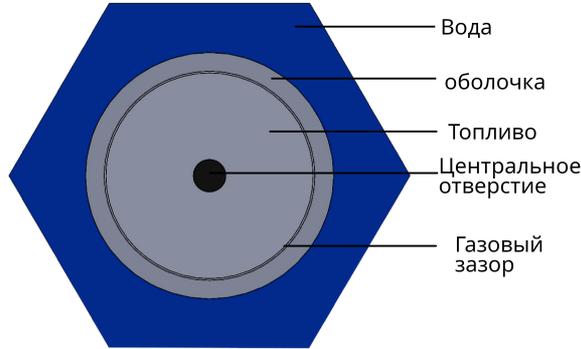


Рис. 1. Штыревая ячейка активной зоны реактора ВВЭР-1200

Стержневой элемент активной зоны реактора, показанный на рис. 1 выше, включает центральное отверстие, заполненное газообразным  $He$ , топливом на основе  $UO_2$ , газовый зазор, заполненный газообразным  $He$ , оболочку из циркалоя (E110) и легкую воду в качестве теплоносителя, длина которой от края до края определяется шагом топливного стержня. Расчетные параметры, необходимые для анализа, приведены в табл. 1.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ, ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Термогидравлика управляется уравнениями Навье-Стокса [4]. Решая эти производные, мы оцениваем физическое явление течения жидкости. Принятый метод предусматривает выполнение предварительных расчетов теплофизических параметров для получения данных термогидравлического анализа и граничных условий [1].

### 2.1. Предварительные расчеты реактора

На входе и выходе мы определяем массовый расход и статическое давление соответственно. Теплофизические параметры материалов стержневых элементов активной зоны реактора, зависящие от температуры, рассчитываются на основе эмпирических соотношений [5–11].

#### 2.1.1. Граничные условия на охладителе

В плоскости входа определяется массовый расход. Это масса теплоносителя, проходящего через плоскость входа в единицу времени. Массовый расход для всей активной зоны реактора известен, поэтому для

стержневой ячейки активной зоны реактора применяется уравнение (2).

$$\dot{m}_{cell} = \frac{\dot{m}_{rc}}{n_{cell}}, \quad (2)$$

где  $\dot{m}_{rc} = 23888$  кг/с — массовый расход теплоносителя первого контура по всей активной зоне реактора,  $n_{cell} = 50856$  — общее количество тепловыделяющих элементов или стержневых ячеек активной зоны реактора во всем реакторе. Таким образом, массовый расход, связанный с одним топливным элементом, составляет 0.469 кг/с. Граничным условием в выходной плоскости является статическое давление; для реактора ВВЭР-1200 это значение обычно составляет 16.2 МПа.

#### 2.1.2. Объемная и линейная скорости выработки тепла

Для источника тепла в модели определена объемная мощность выработки тепла. Чистая электрическая мощность активной зоны реактора ВВЭР-1200 и его КПД известны, поэтому тепловая мощность реактора представлена уравнением (3).

$$N_{th} = \frac{N_e}{\eta}, \quad (3)$$

где  $N_e = 1082$  МВт — полезная электрическая мощность реактора,  $\eta = 0.339$  — чистый КПД реактора. Таким образом, тепловая мощность реактора  $N_{th} = 3192$  МВт. Средняя объемная скорость выработки тепла, связанная с одним топливным элементом, связанная с одним топливным элементом, представлена уравнением (4).

$$\bar{q}_v = \frac{N_{th}}{V_f \cdot n_{cell}} = \frac{4 \cdot N_{th}}{\pi (D_f^2 - D_0^2) \cdot H_{rc} \cdot n_{cell}}, \quad (4)$$

где  $H_{rc} = 3.73$  м — высота активной зоны реактора с топливом,  $D_f = 7.6$  мм — внешний диаметр топлива,  $D_0 = 1.2$  мм — внутренний диаметр топлива. Таким образом, средняя объемная скорость тепловыделения, связанная со штыревой ячейкой активной зоны реактора составляет  $380$  МВт·м<sup>-3</sup>. Средняя линейная скорость тепловыделения в этом случае принимает форму уравнения (5).

$$q_L = q_v \cdot \pi (r_f^2 - r_0^2). \quad (5)$$

Таким образом,  $q_L = 16825.831$  Вт/м.

#### 2.1.3. Теплофизические параметры материалов

Требуемыми теплофизическими параметрами материалов стержневой ячейки активной зоны реактора, зависящими от температуры, являются физическая плот-

Таблица 1. Данные конструкции ВВЭР-1200

Параметр/Компонент	Величина/Комментарий
Номинальная электрическая мощность, МВтэ	1200
Чистая электрическая мощность, $N_e$ , МВтэ	1082
Эффективность работы, $\eta$	0.339
Температура выхода теплоносителя из активной зоны, $T_{out}$ , °С	328.9
Температура входа теплоносителя в активную зону, $T_{inl}$ , °С	298.2
Внешний диаметр оболочки топливного стержня, $D_c$ , мм	9.1
Внутренний диаметр оболочки топливного стержня, $D_{ci}$ , мм	7.73
Диаметр топливного пеллета, $D_f$ , мм	7.6
Шаг топливных стержней, $f_{pitch}$ , мм	12.75
Расход массы первичного охладителя, кг/с	23888
Давление первичного охладителя на выходе из активной зоны, МПа	16.2
Высота рабочего зазора реактора, $H_{rc}$ , мм	3730

ность, изобарная удельная теплоемкость и теплопроводность. Эти параметры были определены на основе эмпирических зависимостей и представлены в виде кривых, как показано на рис. 2.

## 2.2. Аналитическое решение задачи теплопроводности

Задача теплопроводности представляет собой дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее температурное поле тела за определенный период времени [1]. Чтобы вывести уравнение теплопроводности, мы рассмотрим закон теплопроводности Фурье и закон сохранения энергии. Объединение этих двух уравнений дает общую задачу теплопроводности в виде уравнения (1). Однако для решения рас-

сматриваемой инженерной задачи требуется цилиндрическая система координат [1]. Уравнение (1) в цилиндрической системе координат принимает форму одномерного уравнения (6) после учета симметрии в азимутальном и осевом направлениях и стационарного условия теплопередачи в активной зоне.

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (6)$$

где  $r$  — радиус цилиндрического материала,  $\lambda$  — теплопроводность.

Распределение температуры [12] по топливному стержню в любом месте  $r$  принимает форму уравнения (7).

$$T(r_0 \leq r \leq r_f) = T_{f(inner)} + \frac{q_v}{4\lambda_f} \cdot r^2 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \frac{q_v}{2\lambda_f} \cdot r_0^2 \cdot \ln \left| \frac{r}{r_0} \right|, \quad (7)$$

где  $T_{f(inner)}$  — температура внутренней поверхности топлива,  $r_0$  — внутренний радиус топлива,  $\bar{\lambda}_f$  — теплопроводность топлива,  $r_f$  — внешний радиус топлива. Температура внутренней и внешней поверхности топлива определяется из уравнения (8).

$$T_f(r_f) = T_{f(inner)} - \frac{q_v}{4\lambda_f} \cdot r^2 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r_f^2} \right) + \frac{q_v}{2\lambda_f} \cdot r_0^2 \cdot \ln \left| \frac{r_f}{r_0} \right|. \quad (8)$$

Подставляя уравнение (5) в уравнение (8), мы получаем уравнение (9); внутренняя температура кольцевых топливных гранул в любом положении  $r$ .

$$T_{f(inner)} = T_f(r_f) + \frac{qL}{4\pi \cdot \bar{\lambda}_f (r_f^2 - r_0^2)} \times \left[ r^2 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r_f^2} \right) - 2r_0^2 \cdot \ln \left| \frac{r_f}{r_0} \right| \right]. \quad (9)$$

Учитывая тепловое сопротивление в случае кольцевой топливной таблетки и перепад температуры в газовом

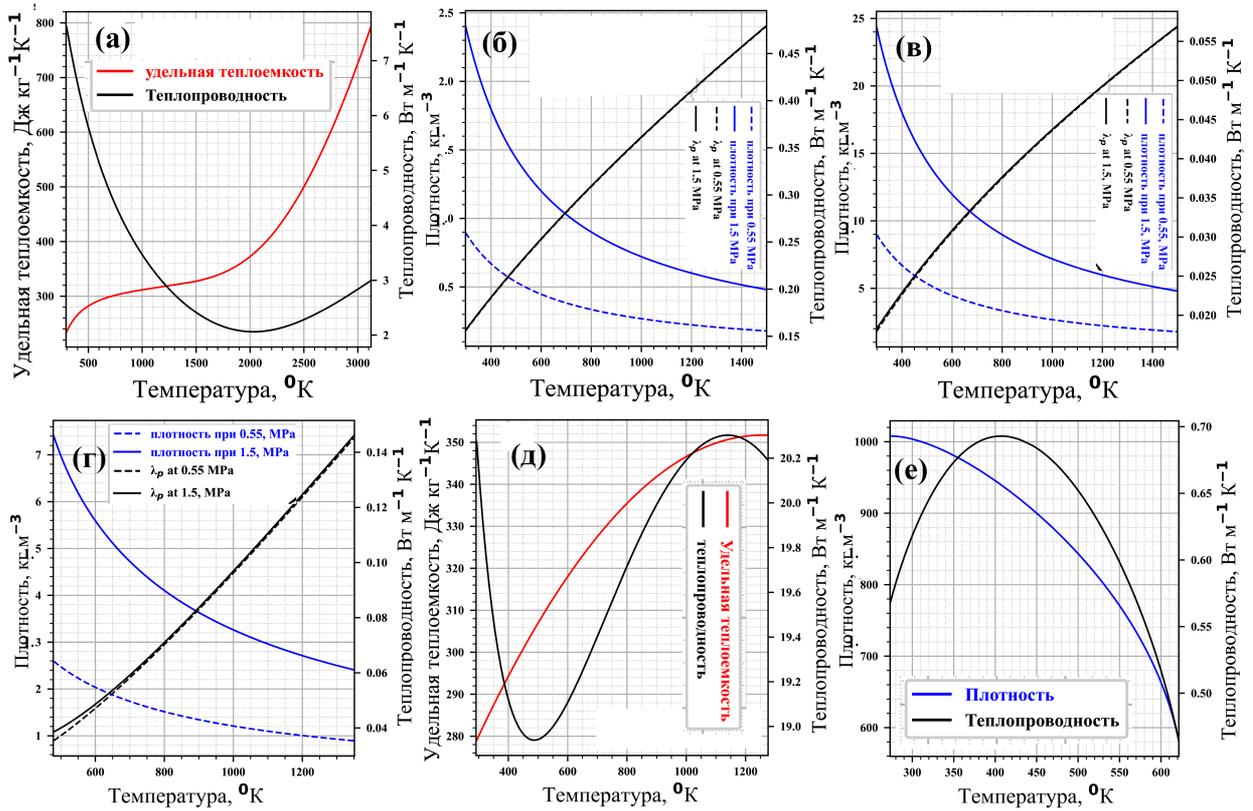


Рис. 2. Теплофизические свойства материалов стержневой ячейки активной зоны реактора в зависимости от температуры: а – изобарная удельная теплоемкость и теплопроводность  $UO_2$ ; б, в, г – плотность и теплопроводность газообразного He, газообразного Ag и пара (при давлении 0.55 и 1.5 МПа) соответственно; д – изобарная удельная теплоемкость и теплопроводность E110; е) – плотность и теплопроводность легкой воды при давлении 16.2 МПа

зазоре, уравнение (9) принимает форму уравнения (10).

$$T_{f(inner)}(r) = T_c(r_f) + \frac{qL}{4\pi} \left[ \frac{2}{r_f \cdot h_g} + \frac{1}{\bar{\lambda}_f (r_f^2 - r_0^2)} \times \left[ r^2 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r_f^2} \right) - 2r_0^2 \ln \left| \frac{r_f}{r_0} \right| \right] \right], \quad (10)$$

где  $h_g$ , Дж/(с·м<sup>2</sup>·К) – эффективный коэффициент теплопередачи в газовом зазоре. С учетом теплопередачи через оболочку тепловыделяющего элемента получается уравнение (11). В этом случае внутренний нагрев не предполагается.

$$T_{f(inner)}(r) = T_c(r_c) + \frac{qL}{4\pi} \left[ \frac{r_f^2}{\bar{\lambda}_c} \cdot \ln \left| \frac{r_c}{r_f} \right| + \left( \frac{2}{r_f \cdot h_g} + \frac{1}{\bar{\lambda}_f (r_f^2 - r_0^2)} \times \left[ r^2 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r_f^2} \right) - 2r_0^2 \ln \left| \frac{r_f}{r_0} \right| \right] \right) \right], \quad (11)$$

где  $\bar{\lambda}_c$  – теплопроводность материала оболочки,  $T_c$  – распределение температуры по материалу оболочки,  $r_c$  – радиус материала оболочки. Теплопередача от поверхности оболочки к теплоносителю определяется законом охлаждения Ньютона [13]. Позже, учитывая перепад температуры охлаждающей жидкости в оболочке по всей пленке, мы получим уравнение (12), представляющее общее решение для топлива с центральным отверстием.

$$T_{f(inner)}(r) = T_w(r_c) + \frac{qL}{4\pi} \left[ \frac{2}{r_c \cdot h_{cw}} + \frac{r_f^2}{\bar{\lambda}_c} \ln \left| \frac{r_c}{r_f} \right| + \left( \frac{2}{r_f \cdot h_g} + \frac{1}{\bar{\lambda}_f (r_f^2 - r_0^2)} \times \left[ r^2 \left( 1 - \frac{r_0^2}{r_f^2} \right) - 2r_0^2 \ln \left| \frac{r_f}{r_0} \right| \right] \right) \right], \quad (12)$$

где  $T_w$  – локальная температура теплоносителя,  $h_{cw}$  – коэффициент конвективной теплопередачи пленки. Общее

решение для температуры оболочки в таком случае определяется уравнением (13).

$$T_c(r_{ci} \leq r \leq r_c) = T_w(r_c) + \frac{qL}{4\pi} \left[ \frac{2}{r_c h_{cw}} + \frac{1}{\lambda_c} \ln \left| \frac{r_c}{r} \right| \right], \tag{13}$$

где  $r_{ci}$  — внутренний радиус тепловыделяющей оболочки. В табл. 2 приведены данные, необходимые для составления профиля распределения температуры стержневой ячейки активной зоны реактора аналитическим методом.

Таблица 2. Таблица параметров

Физическая величина	Величина
Коэффициент теплоотдачи газового зазора, $h_g$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	8000
Конвективный коэффициент теплоотдачи пленки, $h_{cw}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	45000
Средняя теплопроводность UO <sub>2</sub> , Вт/(м·К)	4.836
Средняя теплопроводность E-110, Вт/(м·К)	19.622
Объемная скорость выделения тепла, $q_v$ , МВт/м <sup>3</sup>	380
Линейная скорость выделения тепла, $q_l$ , Вт/м	16825.831
Средняя местная температура охлаждающей среды, $T_w$ , К	586.7

Подставляя данные, приведенные в табл. 2, в уравнения (7), (8), (12) и (13), мы получаем  $T_f(r = r_f) = 807.94$  К,  $T_{f(inner)}(r = r_c) = 1058.66$  К и уравнения (14) и (15).

$$T(r_0 \leq r \leq r_f) = 1170.7756 - 19663342.61r^2 + 14.157606 \ln(r), \tag{14}$$

$$T_c(r_{ci} \leq r \leq r_c) = 231.81 - 68.236965 \ln|r|. \tag{15}$$

Учитывая диапазоны  $r_0 \leq r \leq r_f$  и  $r_{ci} \leq r \leq r_c$  для уравнений (14) и (15) соответственно, профиль радиального распределения температуры стержневой ячейки активной зоны реактора получают, как показано на рис. 3.

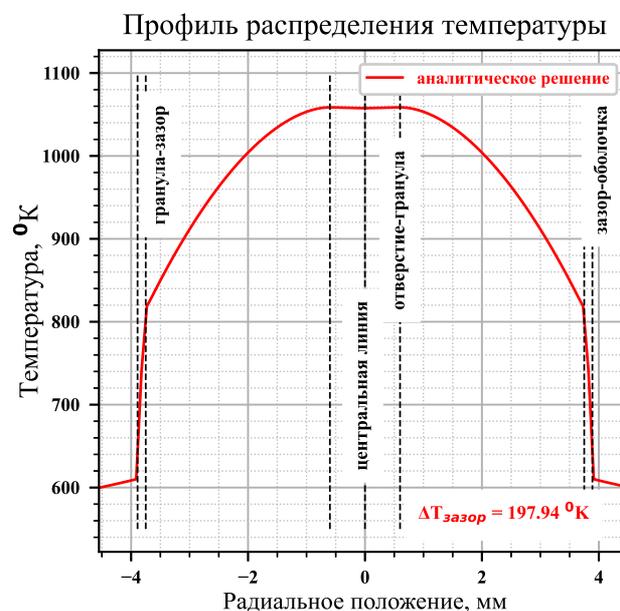


Рис. 3. Результат аналитического решения распределения температуры стержневой ячейки активной зоны реактора

### 2.3. Численное решение уравнения теплопроводности

Численное решение уравнения теплопроводности реализовано в Ansys Fluid Flow CFX — инструменте вычислительной гидродинамики (CFD), который позволяет создавать области твердого тела и жидкости, для которых решаются уравнения переноса тепла [14]. Для всех элементов всей модели стержневой ячейки активной зоны реактора оценивается характер кривой распределения температуры; извлекаются минимальные и максимальные значения температуры ячейки, связанные с каждым слоем материала, и результаты сравниваются с критическими параметрами, чтобы убедиться в отсутствии нарушений в радиальных плоскостях. Результаты сравнения приведены в табл. 3.

Таблица 3. Максимальные и минимальные температуры ячейки

Слой	He, $T_{He}$ , К		Ar, $T_{Ar}$ , К		$H_2O_{(g)}$ , $T_{пар}$ , К		Верхние пределы, К	
	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	Критический.	Макс. допустимый
H <sub>2</sub> O	571	588	571	588	571	588	621.51	593.15
E110	578	612	578	612	578	612	2125.15	1123.15
Газовый зазор	589	790	567	1690	584	1210	5.19	973.15
Центральное отверстие	1090	1100	2160	2170	1620	1630	5.19	1473.15
UO <sub>2</sub>	761	1101	1590	2170	1150	1630	3120	1873.15

На рис. 4 показано радиальное распределение температуры в выходной и входной плоскостях с заменой материалов газового зазора; He, Ar и водяной пар в газовом зазоре и центральном отверстии стержневой ячейки активной зоны реактора. Температуры, связанные с границами слоев на выходе и входе, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Температуры на границах материалов на выходных и входных плоскостях

Плоскость	Граница	Ansys Fluid Flow CFX, T, К		
		He	H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>	Ar
Выход	H <sub>2</sub> O-E110	593	593	593
	E110-газовый зазор	612	612	612
	газовый зазор-UO <sub>2</sub>	775	1160	1600
	UO <sub>2</sub> -центральное отверстие	1100	1630	2170
	Центральная линия	1100	1630	2170
Вход	H <sub>2</sub> O-E110	580	580	580
	E110-газовый зазор	599	599	599
	газовый зазор-UO <sub>2</sub>	764	1160	1590
	UO <sub>2</sub> -центральное отверстие	1090	1620	2160
	Центральная линия	1090	1620	2160

### 2.4 Статистическая перекрестная проверка результатов

Чтобы установить степень корреляции между двумя принятыми методами, мы используем модель линейной регрессии методом наименьших квадратов. Кривые, связанные с численными и аналитическими методами, представлены на рис. 5.

Выборка точек производится на участках кривой, приблизительно показывающих линейную зависимость между предиктором и переменными отклика, т.е. на топливной таблетке в диапазоне температур от 791 до 1082 К. Результаты каждого сравнения включают в себя коэффициент корреляции Пирсона ( $R^2$ ), стандартную ошибку (SE)

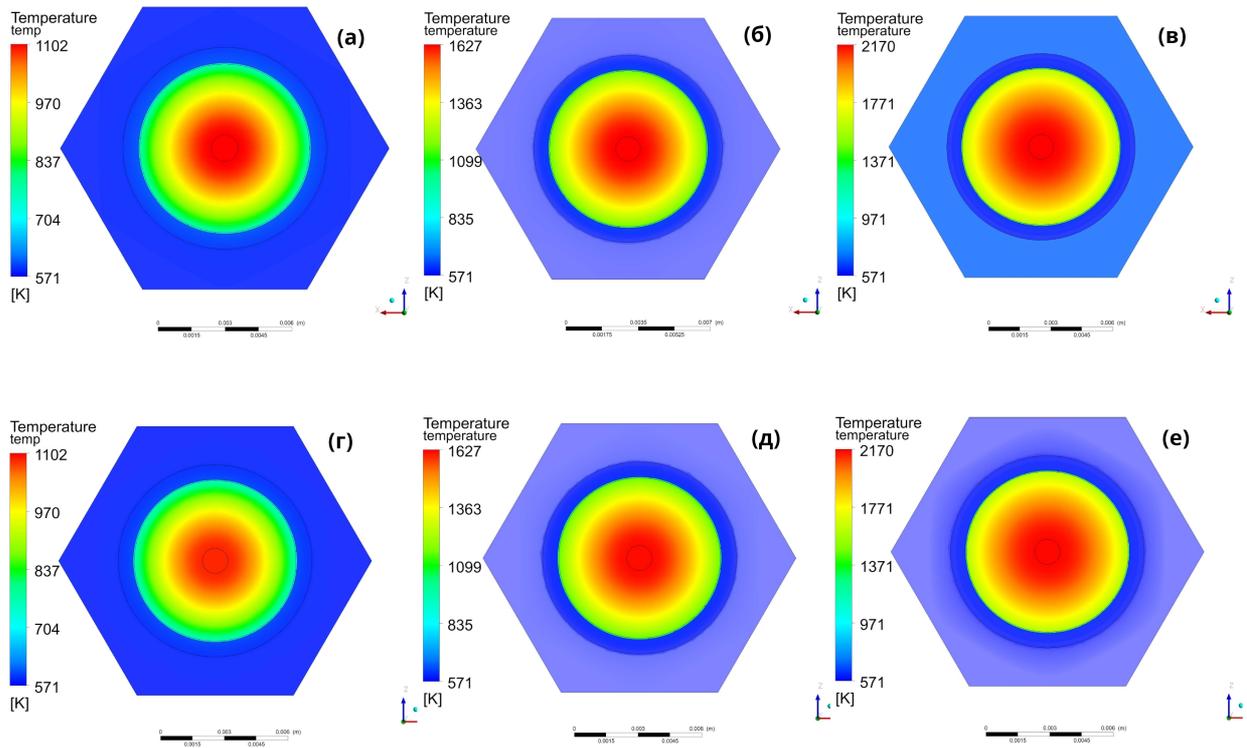


Рис. 4. Распределение радиальной температуры на стержневой ячейке активной зоны реактора во входной и выходной плоскостях: *a, б* — распределение радиальной температуры в выходной плоскости с газообразным He, паром и газообразным Ag в качестве материалов газового зазора соответственно; *г, д, е* — радиальное распределение температуры в плоскости впуска с газообразным He, паром и газообразным Ag в качестве материалов газового зазора

и усредненную процентную среднеквадратичную ошибку (RMSE). Результаты корреляционного и регрессионного анализа представлены на рис. 6.

Таблица 5. Выбранные точки данных для корреляционного и регрессионного анализа

Аналитический	Плоскость входа		Плоскость выхода		Среднее	
	Численный	±% RMSE	Численный	±% RMSE	Численный	±% RMSE
982.85	791.47	14.59	802.66	13.12	797.07	13.84
990.25	815.01	14.17	826.47	12.74	820.74	13.44
1004.00	860.25	13.42	872.21	12.07	866.23	12.73
1010.34	882.03	13.09	894.23	11.77	888.13	12.42
1021.95	923.00	12.51	935.67	11.25	929.33	11.87
1032.10	959.86	12.03	972.94	10.82	966.40	11.41
1040.75	993.23	11.63	1006.69	10.46	999.96	11.03
1044.49	1008.89	11.44	1022.53	10.30	1015.71	10.86
1053.29	1048.59	11.01	1062.67	9.91	1055.63	10.45
1056.96	1068.00	10.81	1082.30	9.73	1075.15	10.26

Параметры, связанные с линейными соответствиями, установленными в ходе регрессионного и корреляционного анализа, приведены в табл. 6.

На рис. 6 показаны установленные линейные соответствия двух принятых моделей на входной и выходной

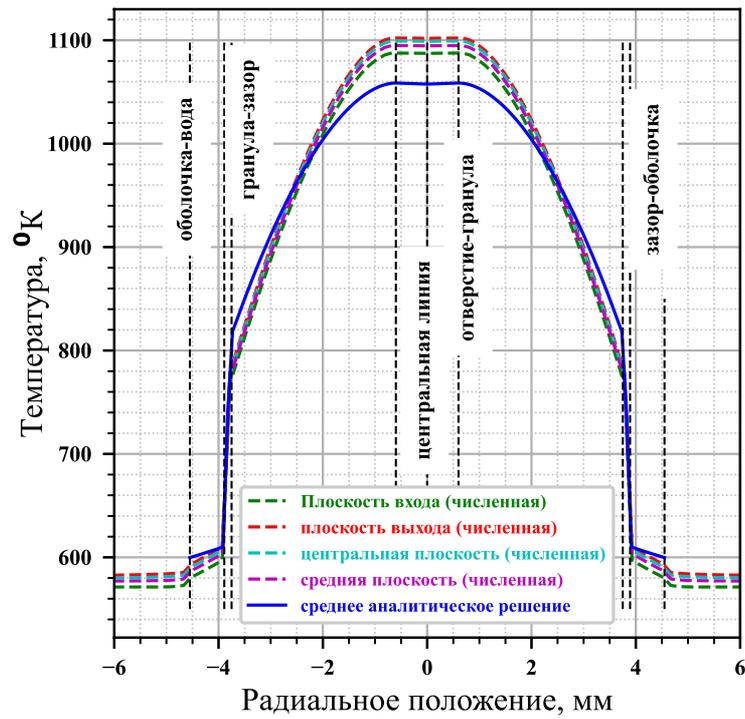


Рис. 5. Сравнительный график результатов аналитического и численного решений

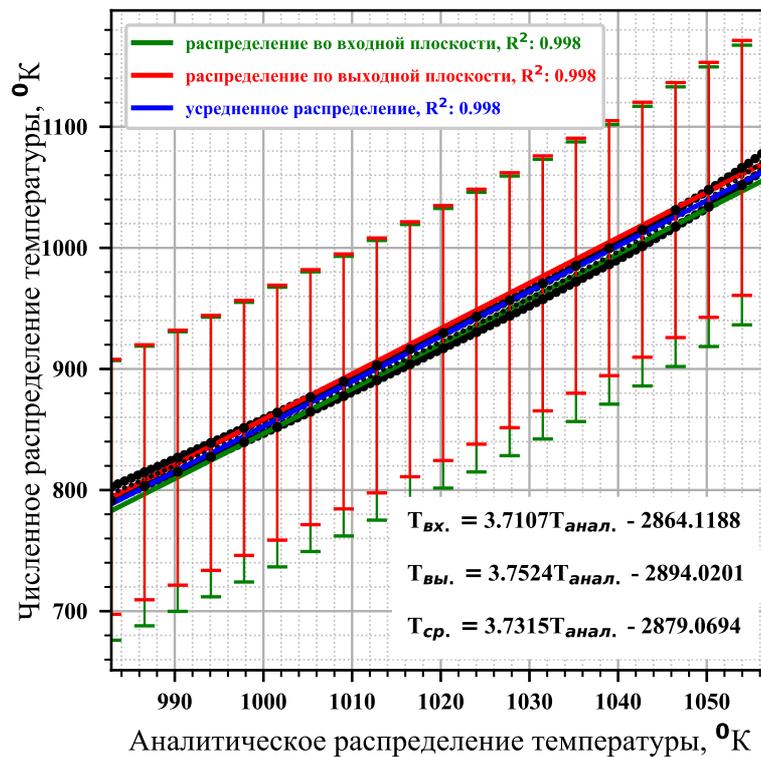


Рис. 6. Результаты корреляционного и регрессионного анализа для аналитических и численных моделей решения

Таблица 6. Результаты корреляционного и регрессионного анализа

Плоскость	Стандартная ошибка, SE	Относительная RMSE	R <sup>2</sup>
Вход	0.0566	12.27%	0.99
Выход	0.0573	11.04%	0.99
Среднее	0.0569	11.65%	0.99

плоскостях, каждая из которых имеет соответствующий коэффициент корреляции Пирсона и уравнение.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для всех испытанных материалов с газовым зазором очевидно, что экстремальные осевые температуры проявились в случае газообразного Ag и пара, тогда как приемлемые значения были достигнуты при использовании газообразного He в газовом зазоре и центральном отверстии. Из профилей распределения температур видно, что температура топливных гранул достигает 2170 К и 1630 К для газообразного Ag и пара соответственно. В случае ВВЭР-1200 максимально допустимая температура в газовом зазоре составляет 973.15 К, что является крайне нарушенной границей при использовании газообразного Ag и пара в качестве материалов газового зазора. Температура по осевой линии немного ниже, чем температура на границе между топливом и материалом центрального отверстия, из-за того, что теплопроводность газообразного He намного ниже, чем у топливного материала. Таким образом, центральное отверстие является важнейшей особенностью конструкции топливного элемента. Снижая среднюю температуру топлива, мы исключаем риск разбухания топливных гранул внутрь, что в противном случае привело бы к их растрескиванию.

Рассматривая две модели, совершенно очевидно, что существует сильная положительная линейная корреляция между численными и аналитическими результатами, о чем свидетельствует коэффициент корреляции Пирсона, равный +0.99. Таким образом, две принятые модели согласуются в допустимых пределах. Учитывая максимальные температуры слоев, приведенные в табл. 3, очевидно, что в стержневой ячейке активной зоны реактора ВВЭР-1200 не нарушены верхние граничные значения.

- 
- [1] Yunus A., Afshin J. Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications. New York, McGraw Hill Higher Education, 2014.
- [2] David W., Necati M. Heat Conduction. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [3] Fourier J. *The Analytical Theory of Heat*. Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940. 2005. pp. 354–365.
- [4] John F. Computational Fluid Dynamics. An Introduction, Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [5] Martin D.G. // *Journal of Nuclear Materials*. **152**, Iss. 2–3. 94 (1988).
- [6] Fink J.K. // *Journal of Nuclear Materials*. **102**, Iss. 1–2. 17 (1981).
- [7] Kestin J., Knierim K., Mason A. // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. **13**, Iss. 1. 229 (1984).
- [8] IAEA. Thermophysical Properties of Materials for Water Cooled Reactors. Austria: International Atomic Energy Agency, 1997.
- [9] Hirschfelder J., Curtis O., Bird R. Molecular Theory of Gases and Liquids. New York, Wiley, 1954.
- [10] Agazhanov A., Samoshkin D., Stankus S. // *Journal of Thermophysics and Aeromechanics*. **28**, Iss. 4. 577 (2021).
- [11] IAEA. Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008.
- [12] Sathiyasheela T., Mohanakrishnan P. // *Journal of Progress in Nuclear Energy*. **52**, Iss. 5. 487 (2010).
- [13] James J., Duderstadt, Louis J. Nuclear Reactor Analysis. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [14] Bergman Theodore L. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Cop., 2011.

## VVER-1200 Reactor Core Pin Cell Steady-State Thermal Hydraulics Analyses and Cross-Validation

R.F. Siro<sup>a</sup>, A.S. Zevyakin<sup>b</sup>

<sup>1</sup>Department of Nuclear Physics and Engineering, National Research Nuclear University NRNU MEPhI Obninsk 249039, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>sr008@campus.mephi.ru, <sup>b</sup>alexzev1991@mail.ru

A nuclear fuel element is designed with materials that are not only capable of withstanding extreme thermal stresses, but also effectively participating in heat transfer from the fuel to the coolant. Despite the poor thermal conductivity of gases relative to solids, it is necessary to include a gas gap in the fuel element to create room for accumulation of fission products. In this case, we have to consider an inert gas that is capable of transferring heat. Therefore, thermal hydraulics analysis becomes a prerequisite procedure for testing the possible violation of the established critical and maximum permissible parameters associated with the materials of the fuel element. To verify the safety of the VVER-1200 reactor core pin cell, the behavior of heat transfer from the fuel to the primary coolant was studied by solving the steady-state form of the heat conduction equation by analytical and numerical techniques. In the calculation schemes, the pin cell temperature distribution was established by solving for the temperature drop along the radial profile. The results revealed a VVER-1200 reactor core pin cell design exhibiting operations that do not violate the established permissible parameters associated with the adopted materials.

PACS: 44.05.+e, 44.10.+i, 44.40.+a, 89.20.Kk, 28.52.Fa, 05.70.-a

*Keywords:* VVER-1200, thermohydraulics analysis, heat conduction, nuclear reactor, thermophysical parameters, numerical solution, analytical solution.

*Received 09 June 2024.*

#### **Сведения об авторах**

1. Роберт Фолкенберг Сиро — студент магистратуры; e-mail: sr008@campus.mephi.ru.
2. Зевякин Александр Сергеевич — ст. преподаватель, инженер-физик; e-mail: alexzev1991@mail.ru.