

УДК 621.039.517.5

Владимир Александрович Горбунов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Сергей Геннадьевич Андрианов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: asg@iff.ispu.ru

Светлана Сергеевна Коновальцева

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: svetlana2014konovaltseva@gmail.com

Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения

Авторское резюме

Состояние вопроса. В реакторах ВВЭР-1000 используются гладкостержневые твэлы цилиндрической формы. Ранее была разработана и верифицирована модель для определения температурного поля твэла в двумерной постановке задачи. Однако принятые в модели допущения не учитывают влияния переменных теплофизических свойств, радиационного теплообмена и наличия отверстия в твэле на конечные параметры температурных полей. Оценка этого влияния является актуальной задачей для повышения экономической эффективности топливного цикла и мощности энергоблоков.

Материалы и методы. Для построения моделей и исследования особенностей энерговыделения в ядерных реакторах используется численный пакет теплофизического моделирования – программный комплекс COMSOL Multiphysics. Моделирование температурных полей выполняется на основе уравнения теплопроводности с внутренним источником тепловыделений при граничных условиях второго рода на торцах твэла и граничных условиях третьего рода на боковой поверхности стержня.

Результаты. Построена осесимметрическая модель в двумерной постановке задачи и трехмерная модель твэла. Методом конечных элементов определены поля распределения температуры. Приведены результаты расчетов для твэлов различного конструктивного исполнения, которые показали, что радиационный теплообмен существенно влияет на максимальную температуру топлива (UO_2). Определена степень влияния переменности теплофизических свойств и радиационного теплообмена. Установлено, что температурные характеристики при различных заданных условиях имеют разницу в диапазоне 15,5–282,0 К (0,8–14,4 %).

Выводы. Построенные модели достоверны и подтверждены ранее верифицированной моделью, характеристиками топливной сборки, применяемой на блоках ВВЭР-1000. Представленные результаты могут применяться для математического моделирования процессов теплообмена как при модернизации эксплуатируемого оборудования, так и в ходе разработки, проектирования и эксплуатации, что позволит повысить эффективность выработки электрической энергии на энергоблоке атомной станции.

Ключевые слова: твэл, температурное поле твэла, радиационный теплообмен, переменные свойства, энерговыделение, удельная мощность энерговыделения

Vladimir Alexandrovich Gorbunov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbunov.w@mai.ru

Sergey Gennadievich Andrianov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: asg@iff.ispu.ru

Svetlana Sergeevna Konovaltseva

Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: svetlana2014konovaltseva@gmail.com

Assessment of radiation heat transfer influence on parameters of temperature fields of various design fuel rods

Abstract

Background. VVER-1000 reactors use cylindrical smooth-core fuel rods. Previously, a model to determine the fuel rod temperature field in a two-dimensional problem statement has been developed and verified. However, modelling assumptions do not consider the influence of variable thermophysical properties, radiation heat transfer, and the opening in the fuel rod on the final parameters of the temperature fields. The impact assessment is an urgent task to improve the economic efficiency of the fuel cycle and the capacity of power units.

Materials and methods. To develop models and study the features of energy release in nuclear reactors, a numerical package of thermophysical modeling COMSOL Multiphysics software is used. The simulation of temperature fields is performed based on the heat equation with an internal heat source, under the boundary conditions of the second kind at the ends of the fuel rod and the boundary conditions of the third kind on the side surface of the rod.

Results. An axisymmetric model in two-dimensional problem statement and a three-dimensional model of the fuel rod are developed. The temperature distribution fields are determined by the finite element method. The results of calculations of various design fuel rods are presented. The results have shown that the radiation heat transfer significantly affects the maximum fuel temperature (UO_2). The impact degree of variability of thermophysical properties and radiation heat transfer is determined. It was found that the temperature characteristics under different specified conditions have a difference in the range of 15,5–282,0 K (0,8–14,4 %).

Conclusions. The developed models are reliable and confirmed by the previously verified model, the characteristics of the fuel assembly used on the VVER-1000 units. The results presented can be used for mathematical modeling of heat transfer processes, both during the modernization of the equipment in operation, and during the development, design, and operation, which will increase the efficiency of electric energy generation at the power unit of a nuclear power plant.

Key words: fuel rod, fuel rod temperature field, radiation heat transfer, variable properties, energy release, power density of energy release

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.023-031

Введение. В настоящее время атомная энергия широко используется во всем мире. Проблема безопасной эксплуатации основного технологического оборудования ядерных объектов затрагивает как российские, так и зарубежные АЭС.

Общемировая тенденция повышения мощности действующего оборудования заставляет эксплуатирующие организации проводить мероприятия, направленные на оптимизацию используемого оборудования и изменение режимов его эксплуатации. Одним из важных направлений может служить проведение научных исследований всех протекающих процессов путем расчета, моделирования и исследования температурных полей, распределений энерговыделения в активной зоне реактора и т.д.

Анализ и повышение эффективности эксплуатации любого тепломеханического оборудования является сложной многофакторной задачей, в которой необходимо учесть особенности каждого элемента ядерного реактора.

Для первичного преобразования ядерной энергии в тепловую на АЭС широко используются водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) [1]. Активная зона данного типа реакторов образована тепловыделяющими сборками, состоящими из стержневых твэлов. При расчете температурных полей внутри активной зоны реактора необходимо решать сопряженные задачи по определению внутреннего энерговыделения в твэле на основе нейтронно-физических характеристик.

В настоящее время широкое распространение получили численные пакеты теплофизического моделирования: Elcut, Flow Vision, Ansys Fluent, Comsol Multiphysics.

Ранее [2, 3] в программном комплексе COMSOL Multiphysics была разработана модель для определения температурного поля твэла в двумерной постановке задачи. Она показала хорошую верификацию полученных результатов по точному аналитическому решению уравнения теплопроводности. Принятые в модели допущения не учи-

тывают влияния переменных теплофизических свойств и радиационного теплообмена и наличия отверстия в твэле на конечные параметры температурных полей.

Целью исследования является оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- построение осесимметрической модели в двумерной, трехмерной постановках задачи сплошного твэла;
- построение трехмерной модели твэла с отверстием диаметром 2,3 мм [4, 5] при соблюдении аналогичного конструктивного исполнения;
- проведение исследований и расчетов температурных полей с учетом радиационного теплообмена и переменных теплофизических свойств.

Методы исследования. В качестве методов исследования температурного поля твэла используются численные пакеты теплофизического моделирования. Для построения моделей и исследования особенностей энерговыделения в ядерных реакторах использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics [6, 7].

Результаты исследования. В ходе исследований рассмотрены различные задачи.

Построена осесимметрическая модель, решенная на основе уравнения теплопроводности в двумерной постановке задачи с внутренним источником тепловыделений [8, 9] при граничных условиях второго рода на торцах твэла и граничных условиях третьего рода на боковой поверхности стержня, а также трехмерная модель при аналогичных условиях [10, 11].

Расчеты производятся в соответствии с требованиями технологического регламента по безопасной эксплуатации АЭС. Установлены максимально допустимая температура топливного сердечника 1690 °С (1963 К) [4, 12, 13] и максимальная температура оболочки твэла 350 °С (623 К). Существует также ограничение, влияющее на структуру твэла, связанное с температурой оболочки с внешней стороны и кризисом кипения теплоносителя. Это ограничение в данной статье не рассматривалось.

Основной функцией активной зоны ядерного реактора является генерация и передача тепловой энергии с поверхности

твэла к теплоносителю. В реакторах ВВЭР-1000 используются гладкостержневые твэлы цилиндрической формы [1]. Для однородного реактора мощность энерговыделения по объему пропорциональна плотности потока нейтронов и определяется выражением [14]:

$$Q(r, z) = Q_0 J_0 \left(\frac{2,405r}{R_3} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{H_3} \right), \quad (1)$$

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

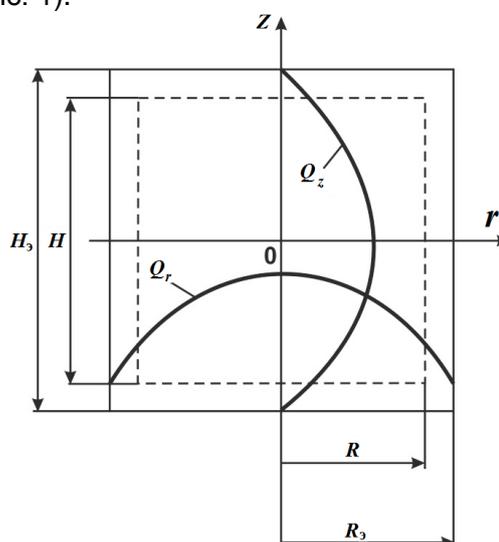


Рис. 1. Распределение энерговыделения по радиусу Q_r и высоте Q_z в однородной цилиндрической активной зоне

Рассмотрим сплошной твэл (рис. 2).

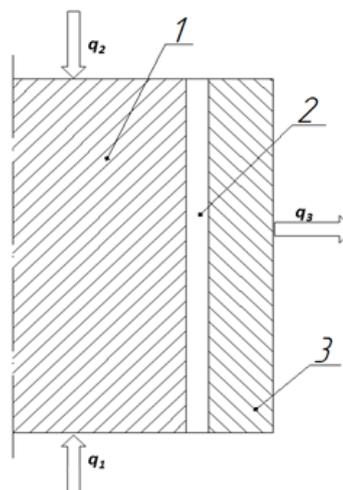


Рис. 2. Схематическое изображение сплошного твэла и граничных условий: 1 – топливо (UO_2); 2 – гелий (He); 3 – оболочка твэла (сплав циркония с ниобием)

В исследовании приняты начальные условия и геометрические параметры [2]: полудлина стержня $l = 1,84$ м; радиус топливного столба (UO_2) $R_0 = 0,0038$ м; радиус твэла $R = 0,00455$ м, а также следующие начальные и граничные условия, определяющие решение:

1) начальная температура стержня

$$T(r, z, 0) = T_0 = 578 \text{ K}, \quad r \in [0, R], \quad z \in [-l, l], \quad (2)$$

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

2) температура окружающей среды $T_{oc} = 578 \text{ K}$;

3) граничные условия второго рода на торцах стержня (рис. 2):

$$q_1(r, -l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R]; \quad (3)$$

$$q_2(r, l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R], \quad (4)$$

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

4) граничное условие третьего рода на боковой поверхности стержня

$$q_3(R, z, \tau) = \alpha(T(R, z, \tau) - T_{oc}), \quad z \in [-l, l], \quad (5)$$

где $q_3(R, z, \tau)$ – тепловой поток с боковой поверхности стержня, Вт/м² (рис. 2); α – коэффициент теплоотдачи от стенки оболочки к теплоносителю, Вт/(м²·К); $T(R, z, \tau)$ – температура точек боковой поверхности стержня в момент времени τ , К.

В расчетной модели [2] использовалось уравнение теплопроводности для твэла при постоянных теплофизических свойствах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{q}{c\rho}, \quad (6)$$

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

Рассмотрим уравнение теплопроводности для твэла при переменных свойствах в стационарном режиме нагрева:

$$q = -\text{div}(\lambda \nabla T), \quad (7)$$

где div – оператор дивергенции; ∇T – градиент температурного поля.

Граничное условие четвертого рода на внешней поверхности топлива (UO_2) имеет вид

$$q_4(R_0, z, \tau) = \lambda_r(T) \frac{\partial T}{\partial r}, \quad z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty], \quad (8)$$

где $q_4(R_0, z, \tau)$ – тепловой поток с внешней поверхности топлива (UO_2), Вт/м²; λ_r – коэффициент теплопроводности гелия, Вт/(м·К).

Граничное условие четвертого рода на внутренней поверхности оболочки твэла имеет вид

$$q_4(R_{01}, z, \tau) = \lambda_u(T) \frac{\partial T}{\partial r}, \quad z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty], \quad (9)$$

где $q_4(R_{01}, z, \tau)$ – тепловой поток с внутренней поверхности твэла, Вт/м²; λ_u – коэффициент теплопроводности оболочки, Вт/(м·К); $R_{01} = 0,0038$ м – радиус внутренней поверхности оболочки.

В ходе исследования получены значения удельной мощности энерговыделения при постоянных и переменных свойствах. Параметры указаны в табл. 1 при достижении максимально допустимой температуры топлива $T_{\max}^{\text{топливо}} = 1963$ К и максимально допустимой температуры оболочки $T_{\max}^{\text{оболочка}} = 623$ К.

Таблица 1. Значения удельной мощности энерговыделения при ограничениях по температуре оболочки и топлива в твэле

Теплофизические свойства	Удельная мощность энерговыделения q , МВт/м ³	
	при $T_{\max}^{\text{оболочка}}$	при $T_{\max}^{\text{топливо}}$
При постоянных свойствах	759,3	764,1
При переменных свойствах	482,2	706,4

Разрушение оболочки при переменных свойствах соответствует удельной мощности энерговыделения 482,2 МВт/м³. Различие между постоянными и переменными свойствами существенное. Наибольшая ошибка по удельной мощности при $T_{\max}^{\text{оболочка}}$ составляет 36,5 %.

На рис. 3 показано температурное поле сплошного твэла. Отметим, что при переменных свойствах с удельной мощностью 764,1 МВт/м³ топливо и оболочка твэла разрушаются.

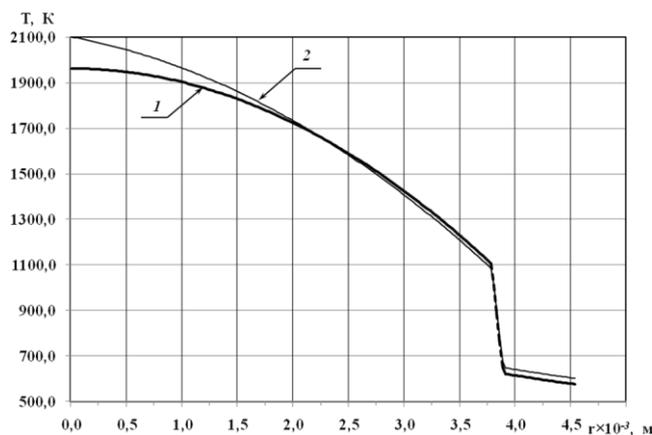


Рис. 3. Температурное поле сплошного твэла при удельной мощности энерговыделения $764,1 \text{ МВт/м}^3$: 1 – при постоянных свойствах; 2 – при переменных свойствах

При переменных свойствах температура самых разогретых точек равна $2101,7 \text{ К}$. Различие между переменными и постоянными свойствами по максимальной температуре топлива составляет $138,7 \text{ К}$ ($7,1 \%$). Это доказывает необходимость учета переменных теплофизических свойств.

В зазоре сплошного твэла между топливом и оболочкой находится гелий. Газ является прозрачной средой, в которой надо учитывать два вида теплообмена: конвективный и радиационный. Предварительные исследования показали, что учет конвективного теплообмена находится в пределах погрешности.

Радиационный теплообмен может существенно влиять на температурное поле твэла. Comsol Multiphysics позволяет учесть эту радиационную составляющую.

Для постановки задачи учитывался механизм передачи теплоты радиационным теплообменом от поверхности к окружающему пространству при следующих допущениях:

1. Окружающая среда имеет постоянную среднюю интегральную температуру T_{amb} , согласно методике, описанной в Comsol Multiphysics [6].

2. Окружающая среда имеет свойства черного тела, так как рассматриваемая среда абсолютно замкнута.

В связи со сложностью определения температуры окружающей среды, видимой поверхностью, эти предположения позволяют выразить падающий тепловой поток через среднюю интегральную температуру [6]:

$$E_{пад} = \sigma T_{amb}^4, \quad (10)$$

где $E_{пад}$ – падающий тепловой поток на поверхность, Вт/м^2 ; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана; T_{amb} – средняя интегральная температура окружающей среды, К .

Для учета радиационного теплообмена на границах с радиусами R_0 и R_{01} в дальнейших исследованиях будет рассматриваться сложный теплообмен.

Уравнение для поглощенного излучающего потока теплоты от внешней поверхности топлива (UO_2) к окружающему пространству имеет вид

$$q = \lambda_r(T) \frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{amb}^4), \quad (11)$$

$$z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty],$$

где ε – коэффициент теплового излучения излучаемого тела; $T = T_0(R_0, z, \tau)$ – температура на внешней границе топлива (UO_2), К .

Уравнение для поглощенного излучающего потока теплоты от окружающего пространства к внутренней поверхности оболочки имеет вид

$$q = \lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4), \quad (12)$$

$$z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty],$$

где $T = T_0(R_{01}, z, \tau)$ – температура на внутренней границе оболочки твэла, К .

Для оценки влияния в Comsol Multiphysics была построена трехмерная модель сплошного твэла на основе геометрических характеристик, которые были рассмотрены ранее, с учетом переменных теплофизических свойств.

В табл. 2 показаны значения удельной мощности энерговыделения без учета и с учетом радиационного теплообмена в зазоре. Параметры указаны при достижении ограничений по максимально допустимой температуре топлива $T_{max}^{топливо} = 1963 \text{ К}$ и максимально допустимой температуре оболочки $T_{max}^{оболочка} = 623 \text{ К}$.

Таблица 2. Значения удельной мощности энерговыделения без учета и с учетом теплового излучения в зазоре

Теплофизические свойства	Удельная мощность энерговыделения q , МВт/м^3	
	при $T_{max}^{оболочка}$	при $T_{max}^{топливо}$
Без учета радиационного теплообмена	482,2	706,4
С учетом радиационного теплообмена	492,7	712,4

Анализ данных табл. 2 показывает, что удельная мощность энерговыделения в твэле с зазором с учетом радиационного теплообмена выше. Наибольшая ошибка составляет 2,2 % и соответствует ограничению по температуре оболочки. Радиационный теплообмен оказывает влияние на температурное поле твэла.

На рис. 4 изображено температурное поле сплошного твэла при удельной мощности энерговыделения $706,4 \text{ МВт/м}^3$ и наблюдается разница температур в области топлива.

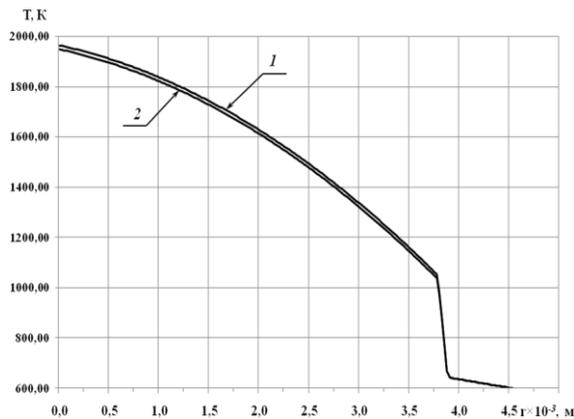


Рис. 4. Температурное поле сплошного твэла при удельной мощности энерговыделения $706,4 \text{ МВт/м}^3$: 1 – при переменных свойствах; 2 – при переменных свойствах с учетом радиационного теплообмена

При удельной мощности энерговыделения $706,4 \text{ МВт/м}^3$ при переменных свойствах температура самых разогретых точек твэла с зазором с учетом радиационного теплообмена ниже, чем без его учета, и составляет $1947,5 \text{ К}$. Температура топлива снижается на $15,5 \text{ К}$ ($0,8 \%$), что указывает на необходимость учета радиационного теплообмена в зазоре сплошного твэла.

Исследуем влияние радиационного теплообмена на температурные поля в отверстии и в зазоре твэла. Механизм передачи теплоты от поверхности к окружающему пространству описан ранее.

Рассмотрим трубку с зазором, состоящую из сплава циркония с ниобием, в которую помещены таблетки из диоксида урана, с отверстием диаметром $2,3 \text{ мм}$ в середине.

Построена трехмерная модель твэла с отверстием, решенная на основе уравнения теплопроводности, с внутренним источником тепловыделений: при граничных условиях второго рода на торцах твэла;

граничных условиях третьего рода на боковой поверхности стержня; граничных условиях четвертого рода на внутренних поверхностях в зазоре и отверстии (рис. 5).

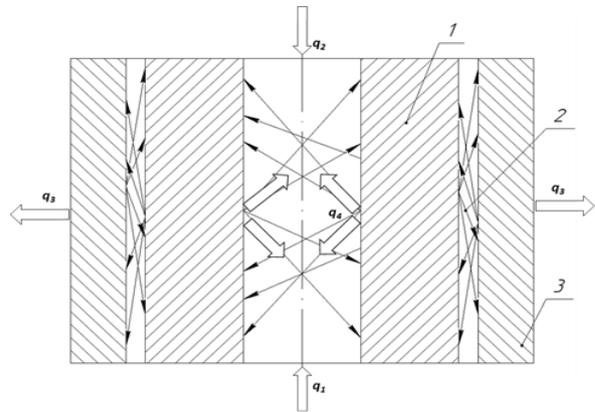


Рис. 5. Схематическое изображение твэла с отверстием и граничными условиями: 1 – топливо (UO_2); 2 – гелий (He); 3 – оболочка твэла (сплав циркония с ниобием)

Сравнение построенных температурных полей проводилось при одинаковой мощности энерговыделения. Благодаря геометрии твэла с отверстием, количество топлива снижается. Для перерасчета удельной мощности был использован расчетный коэффициент

$$k = \frac{V_{\text{спл}}}{V_{\text{отв}}}, \quad (13)$$

где $V_{\text{спл}}$ – объем сплошной топливной таблетки, м^3 ; $V_{\text{отв}}$ – объем топливной таблетки с отверстием, м^3 .

Удельная мощность энерговыделения с учетом расчетного коэффициента находится по выражению

$$q_{\text{отв}} = q_{\text{спл}} k, \quad (14)$$

где $q_{\text{отв}}$ – удельная мощность энерговыделения твэла с отверстием, Вт/м^3 ; $q_{\text{спл}}$ – удельная мощность энерговыделения сплошного твэла, Вт/м^3 .

В табл. 3 указаны параметры удельной мощности энерговыделения при достижении максимально допустимой температуры топлива $T_{\text{max}}^{\text{топливо}} = 1963 \text{ К}$ и максимально допустимой температуры оболочки $T_{\text{max}}^{\text{оболочка}} = 623 \text{ К}$.

Различие между удельными мощностями для сплошного твэла и твэла с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре составило $151,1 \text{ МВт/м}^3$. Наступление ограничения по максималь-

ным температурам топлива и оболочки происходит позднее в твэле с отверстием.

Таблица 3. Значения удельной мощности энерговыделения

№ исследования	Удельная мощность энерговыделения q , МВт/м ³	
	при T_{\max} оболочка	при T_{\max} топливо
1. С учетом радиационного теплообмена в зазоре для сплошного твэла	492,7	712,4
2. С учетом радиационного теплообмена в зазоре для твэла с отверстием	519,7	949,8
3. С учетом радиационного теплообмена в зазоре и отверстия для твэла с отверстием	532,4	1163,3

Удельная мощность при $T_{\max}^{\text{топливо}}$ в твэле с учетом радиационного теплообмена в отверстии выше на 18,4 %, чем без его учета.

При построении графика температурного поля твэлов (рис. 6) было выбрано эталонное значение удельной мощности энерговыделения сплошного твэла 712,4 МВт/м³.

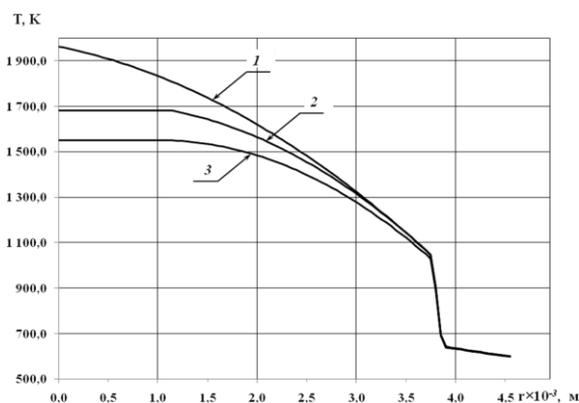


Рис. 6. Температурное поле сплошного твэла при удельной мощности 712,4 МВт/м³ и твэлов с отверстием при 783 МВт/м³: 1 – сплошной твэл с учетом радиационного теплообмена в зазоре; 2 – твэл с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре; 3 – твэл с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре и отверстия

Сравнительный анализ полученных данных (рис. 6) показывает, что геометрические характеристики твэла влияют на его температурное поле. Различие между

наиболее разогретыми точками составляет 282,0 К (14,4 %).

Анализ результатов расчета температурных полей твэла с отверстием показывает, что радиационный теплообмен в отверстии снижает температуру топлива. Различие между наиболее разогретыми точками составляет 131,9 К (7,8 %) Значение удельной мощности, при которой наступают ограничения по топливу и оболочке, увеличивается.

Выводы. В ходе работы в программном пакете Comsol Multiphysics удалось получить расчетные модели, обладающие достаточной точностью для инженерного анализа.

Определены и построены температурные поля твэлов при их различном конструктивном исполнении с учетом и без учета переменных теплофизических свойств и радиационного теплообмена.

На основе работы моделей получены следующие результаты.

1. Для поддержания целостности и эксплуатационных характеристик топлива и оболочки твэла важно учитывать переменные свойства, так как различие между температурами при постоянных и переменных свойствах существенно. Наибольшая ошибка по удельной мощности при $T_{\max}^{\text{оболочка}}$ составляет 36,5 %.

2. Радиационный теплообмен в зазоре сплошного твэла влияет на температурное поле. Наибольшая ошибка составляет 2,2 % по удельной мощности тепловыделения при ограничении по температуре оболочки.

3. При переменных теплофизических свойствах с учетом радиационного теплообмена в зазоре сплошного твэла происходит снижение температуры топлива. Различие по максимальной температуре топлива составляет 15,5 К (0,8 %).

4. Геометрические характеристики и радиационный теплообмен влияют на температурное поле твэлов. Различие между удельными мощностями для сплошного твэла и твэла с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре составляет 151,1 МВт/м³.

5. Радиационный теплообмен в отверстии твэла снижает температуру топлива. При этом значение удельной мощности увеличивается.

Представленные результаты расчета температурных полей и расчетные модели

могут применяться для математического моделирования процессов теплообмена в ядерных реакторах, а также для разработки, проектирования и эксплуатации атомных станций.

Список литературы

1. **Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И.** Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: учеб. пособие. – М.: НИЯУМИФИ, 2011. – 116 с.
2. **Разработка** модели по определению температурного поля твэла в двумерной постановке задачи / В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 174–184.
3. **Старков В.А., Марихин Н.Ю.** Методика и программа расчета стационарного температурного поля в системе многозонных цилиндрических ТВЭЛов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 54–62.
4. **Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В.** Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
5. **Горбунов В.А.** Моделирование теплогидравлических процессов в ядерных реакторах в Comsol multiphysics: учеб. пособие / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2019. – 180 с.
6. **Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4, 2018.** – 702 с. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.he at/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>.
7. **Егоров В.И.** Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2006. – 77 с.
8. **Ушаков П.А., Субботин В.И.** Приближенные расчеты гидродинамических характеристик турбулентного потока жидкости в кольцевых каналах // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10, № 5. – С. 1025–1030.
9. **Логинов В.С.** Приближенные методы теплового расчета активных элементов электрофизических установок. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 273 с.
10. **Горбунов В.А.** Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 216 с.
11. **Бирюлин Г.В.** Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB / СПбГУИ-ТМО. – СПб., 2006. – 76 с.
12. **Перимов Р.Р., Сорокин Г.А., Сорокина Т.В.** Моделирование теплотехнической

надежности твэла при различных вариантах изменения энерговыделения и температур // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 5. – С. 150–153.

13. **Dolgov A.** Effective fuel solutions using SNF reprocessing // JSC "Tvel", International Forum "AtomExpo". – Moscow, May 31, 2016. URL: <http://2016.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/1/Dolgov.pdf>.

14. **Дементьев Б.А.** Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

References

1. Leskin, S.T., Shelegov, A.S., Slobodchuk, V.I. *Fizicheskie osobennosti i konstruktsiya reaktora VVER-1000* [Physical features and design of the VVER-1000 reactor]. Moscow: NIYaUMIFI, 2011. 116 p.
2. Gorbunov, V.A., Ivanova, N.B., Lonshakov, N.A., Belov, Ya.V. *Razrabotka modeli po opredeleniyu temperaturnogo polya tvela v dvumernoy postanovke zadachi* [Development of model for determination of temperature fields of fuel rods in two-dimensional formulation of the problem]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2019, no. 2, pp. 174–184.
3. Starkov, V.A., Marikhin, N.Yu. *Metodika i programma rascheta statsionarnogo temperaturnogo polya v sisteme mnogozonnykh tsilindricheskikh TVELov* [Method and program of calculation of stationary temperature field in the system of multi-zone cylindrical fuel rods]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2013, no. 1, pp. 54–62.
4. Kolpakov, G.N., Selivanikova, O.V. *Konstruktsii tvelov, kanalov i aktivnykh zon energeticheskikh reaktorov* [Designs of fuel rods, channels and cores of power reactors]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. 118 p.
5. Gorbunov, V.A. *Modelirovanie teplogidravlicheskikh protsessov v yadernykh reaktorakh v Comsol multiphysics* [Simulation of thermohydraulic processes in nuclear reactors in Comsol multiphysics]. Ivanovo, 2019. 180 p.
6. *Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4, 2018.* – 702 p. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.he at/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>.
7. Egorov, V.I. *Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploprovodnosti* [Application of computers for solving problems of thermal conductivity]. Saint-Petersburg: NIU ITMO, 2006. 77 p.
8. Ushakov, P.A., Subbotin, V.I. *Priblizhennyye raschety gidrodinamicheskikh kharakteristik turbulentsnogo potoka zhidkosti v koltsevykh kanalakh* [Approximate calculations of hydrodynamic characteristics of turbulent fluid flow in ring channels]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1972, vol. 10, no. 5, pp. 1025–1030.

9. Loginov, V.S. *Priblizhennyye metody teplovogo rascheta aktivnykh elementov elektrofizicheskikh ustanovok* [Approximate methods of thermal calculation of active elements of electrophysical installations]. Moscow: FIZMATLIT, 2009. 273 p.

10. Gorbunov, V.A. *Modelirovanie teploobmena v konechno-elementnom pakete FEMLAB* [Heat transfer simulation in the finite element FEMLAB package]. Ivanovo, 2008. 216 p.

11. Biryulin, G.V. *Teplofizicheskie raschety v konechno-elementnom pakete COMSOL/FEMLAB* [Thermophysical calculations in the COMSOL/FEMLAB finite element package]. Saint-Petersburg, 2006. 76 p.

12. Perimov, R.R., Sorokin, G.A., Sorokina, T.V. *Modelirovanie teplotekhnicheskoy nadezhnosti*

tvela pri razlichnykh variantakh izmeneniya energovydeleniya i temperatur [Modeling of thermal-mechanical reliability of the fuel rod with different variants of change of energy release and temperatures]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2004, vol. 26, no. 5, pp. 150–153.

13. Dolgov, A. Effective fuel solutions using SNF reprocessing. JSC “Tvel”. International Forum “AtomExpo”. Moscow, 31 May, 2016. URL: <http://2016.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/1/Dolgov.pdf>.

14. Dement'ev, B.A. *Yadernye energeticheskie reaktory* [Nuclear power reactor]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 352 p.