УДК 621.039.517.5; 004.942 DOI: 10.26583/npe.2023.2.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ПАРАМЕТРА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА НА КОЭФФИЦИЕНТ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОВОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ПО ВЫСОТЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, Н.А. Лоншаков, С.Г. Андрианов, П.А. Минеев

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

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

Представлены результаты численного исследования эффективности эксплуатации тепловыделяющих элементов активной зоны водо-водяных реакторов (ВВЭР), заполненных таблетками из диоксида урана (UO_2). Получены результаты исследования трехмерного моделирования энерговыделения твэлов. Проведено сравнение зависимостей температур топлива и оболочки твэлов от удельной мощности, выделяемой на кубический метр топлива. В качестве топлива исследованы металлический уран и диоксид урана. Определяющими параметрами выбраны технические ограничения по безопасной эксплуатации тепловыделяющих сборок (ТВС). Выполнен анализ степени влияния радиационного теплообмена на удельную мощность, выделяемую в твэле. Получены уравнения, отражающие зависимости удельной мощности, выделяемой на кубометр топлива, от диаметра отверстия внутри таблеток топлива при максимальном тепловом потоке. Работа выполнена с использованием численного пакета теплофизического моделирования – программного комплекса COMSOL Multiphysics. Расчеты показывают, что за счет дополнительного обогащения ураном-235 с увеличением диаметра отверстия топливных таблеток при фиксированной тепловой мощности твэла снижается коэффициент неравномерности температурного поля по высоте активной зоны реактора.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, твэл, топливная таблетка, температурное поле, удельная тепловая мощность, коэффициент неравномерности энерговыделения.

Горбунов В.А., Теплякова С.С., Лоншаков Н.А., Андрианов С.Г., Минеев П.А. Исследование влияния конструктивного параметра тепловыделяющего элемента на коэффициент неравномерности теплового выделения по высоте реактора ВВЭР-1000. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 2. – С. 27-40. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.03 .

ВВЕДЕНИЕ

Современные тепловыделяющие сборки ТВСА-Т, ТВСА-12, ТВСА-12PLUS и ТВС-2М для реакторов ВВЭР-1000 позволяют повысить технико-экономические характеристики АЭС

© ***В.А. Горбунов, С.С. Теплякова, Н.А. Лоншаков, С.Г. Андрианов, П.А. Минеев, 2023***

за счет увеличения длительности кампании и внедрения удлиненных топливных циклов. Активная зона данного типа реакторов образована тепловыделяющими сборками, состоящими из стержневых твэлов [1, 2], которые, в свою очередь, заполнены топливными таблетками, изготовленными из диоксида урана U-235 (UO_2). Для обеспечения безопасности эксплуатации ядерного реактора введены строгие ограничения по максимальной температуре ядерного топлива и циркониевой оболочки твэлов [3, 4].

При расчете температурных полей внутри активной зоны реактора необходимо решать сопряженные задачи по определению внутреннего энерговыделения в твэле на основе нейтронно-физических характеристик [5]. Специализированное программное обеспечение для проведения таких расчетов недоступно для значительного круга пользователей [6 – 10]. Широкое распространение получили численные пакеты теплофизического моделирования, открытые для учебного или некоммерческого использования [11 – 14]: Elcut, Flow Vision, Ansys Fluent, COMSOL Multiphysics.

Модель активной зоны реакторов ВВЭР имеет простую цилиндрическую форму. Начало координат находится в центре активной зоны. Для цилиндра используются две координаты – радиус r и высота z по оси цилиндра. Активная зона имеет эффективные радиус $R_э$ и высоту $H_э$. В однородной активной зоне, когда топливо и другие материалы равномерно распределены по объему [15 – 17], энерговыделение реактора по объему пропорционально плотности потока нейтронов.

В процессе эксплуатации энерговыделение реактора происходит неравномерно. В радиальном направлении оно изменяется в соответствии с функциями Бесселя нулевого порядка, а в осевом – по косинусоидальному закону. Для учета неравномерности вводятся коэффициенты, определяемые отношением максимального энерговыделения к среднему. Для учета неравномерности в радиальном направлении используется коэффициент неравномерности активной зоны k_r [15 – 17]:

$$k_r = Q_0/\langle Q_r\rangle, \tag{1}$$

где Q_0 – максимальное значение энерговыделения в центре реактора, Вт; $\langle Q_r\rangle$ – среднее энерговыделение по радиусу активной зоны, Вт. Максимальное значение коэффициента неравномерности $k_r^{max} = 2{,}32$. Значение коэффициента показывает, что центральный канал имеет тепловую нагрузку в 2,32 раза выше средней по радиусу.

Для учета неравномерности в осевом направлении используется коэффициент неравномерности по высоте активной зоны k_z:

$$k_z = Q_0/\langle Q_z\rangle, \tag{2}$$

где Q_0– максимальное значение энерговыделения в центре реактора, Вт; $\langle Q_z\rangle$ – среднее энерговыделение по высоте реактора, Вт. Максимальное значение коэффициента $k_z^{max} = 1{,}57$.

На практике часто используется объемный коэффициент неравномерности k_V, определяемый из выражения

$$k_V = k_r \cdot k_z. \tag{3}$$

Для однородной цилиндрической активной зоны реактора без отражателя максимальный объемный коэффициент неравномерности более чем в три раза превышает средний по активной зоне реактора и составляет $k_V = 3{,}64$. Это вызывает напряженные условия работы твэлов, а ограничения, связанные с безопасностью эксплуатации тепловыделяющих элементов, уменьшают допустимую мощность реактора. Допустимый тепловой поток не должен превышать максимального значения. Поэтому выравнивание энерговыделения по объему активной зоны позволяет получить большую мощность при прочих равных условиях [8]. Компоновкой активной зоны добиваются частичного выравнивания тепловыделений по радиусу реактора. На практике, как правило, более обогащенные тепловыделяющие сборки устанавливаются по периферии реактора с даль-

нейшей их перестановкой в процессе эксплуатации ближе к центру.

Иногда предлагается проводить выравнивание тепловыделения по высоте активной зоны за счет неравномерного распределения по высоте выгорающего теплоносителя. Другим способом выравнивания рассматривается введение регулирующих стержней снизу и расположения их в области максимальной плотности тепловых нейтронов.

Накопленный опыт эксплуатации реакторных установок ВВЭР-1000 показал, что выравнивание тепловыделений по высоте активной зоны реактора является актуальным.

Целью работы является поиск путей повышения эффективности эксплуатации тепловыделяющих элементов путем снижения коэффициента неравномерности по высоте активной зоны реактора ВВЭР-1000 [3, 15, 18].

Задачи работы, которые должны быть решены для достижения цели.

1. Анализ особенностей энерговыделения твэлов в реакторе ВВЭР-1000, построение трехмерных моделей по определению температурного поля твэлов с использованием метода конечных элементов и программного комплекса COMSOL Multiphysics.

2. Исследование твэлов при максимальной тепловой нагрузке и наступлении температурных ограничений.

3. Построение трехмерной модели для определения температурного поля твэла и ее последующий численный расчет. Модель включает уравнение теплопроводности с внутренним источником энергии, учитывает зависимость теплофизических свойств уранового топлива, гелия и оболочки из сплава с цирконием от температуры [17, 19].

4. Исследование влияния материала (двуокись урана UO_2 и металлический уран U) топливных таблеток твэла, имеющего различный коэффициент теплопроводности, на коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте активной зоны [2, 19].

5. Исследования влияния радиационной составляющей теплообмена внутри отверстий в топливных таблетках и зазоре между топливом и оболочкой твэла при 2D-моделировании с использованием алгоритма радиационного теплообмена, представленного в программном комплексе COMSOL Multiphycics.

6. Сравнение результатов исследования влияния радиационной составляющей теплообмена внутри отверстий в топливных таблетках и зазоре между топливом и оболочкой твэлов с помощью 2D- и 3D-моделей.

7. Исследование влияния радиационной составляющей для твэлов с одинаковой тепловой мощностью, но при разной степени дополнительного обогащения ураном-235 и различных диаметрах отверстия топливных таблеток на основе ограничений по максимальным температурам топлива и оболочки твэла.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Реактор ВВЭР-1000 предназначен для выработки тепловой энергии за счет цепной реакции деления атомных ядер. Нагрев воды осуществляется в активной зоне за счет тепловыделения твэлов.

Твэл представляет собой цилиндр с наружным диаметром топливного столба 7,6 мм и высотой 3,68 м, изготовленного из диоксида урана UO_2. Топливный столб из UO_2 находится соосно внутри оболочки из сплава циркония с ниобием. Наружный диаметр трубки равен 9,1 мм, толщина стенки 0,65 мм. Зазор между топливом и оболочкой составляет 0,1 мм. При герметизации концевых пробок твэла его внутренняя полость заполняется гелием до давления 2,0 МПа. Объёмная плотность тепловыделения изменяется от 100 до 600 МВт/м^3 с шагом 100 МВт/м^3.

Температура твэла с таблетками из UO_2 не должна достигать 1690°С (1963 К). Если температура превышает данное ограничение, то резко увеличивается выход газообразных продуктов [3]. Средняя температура воды, омывающей твэл, составляет 285°С (578 К). Внешняя температура оболочки не должна превышать 350°С (623 К). При пре-

вышении температуры 350°С прочностные свойства сплава оболочки твэла резко уменьшаются, а пластические увеличиваются. Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности твэла к теплоносителю составляет ~ 50000 Вт/(м^2·К).

При решении задачи принимались следующие условия:

– теплофизические свойства UO_2, сплава циркония Н1 и гелия зависят от температуры;

– расчет производится для твэлов, находящихся при работе на максимальной тепловой нагрузке в центре реактора;

– не учитывается влияние режима течения потока жидкости на теплообмен поверхности твэла;

– учитывается, что выгорание топлива в твэлах происходит равномерно (задача стационарная).

Для учета изменения теплофизических свойств задаются массивы данных по теплопроводностям в зависимости от температуры [4, 20, 21]. В работе используются теплофизические свойства UO_2, U, сплава Н1 и Не при давлении 2 МПа в зависимости от температуры.

В исследовании приняты геометрические параметры – полудлина стержня $l = 1{,}84$ м; радиус стержня $R_0 = 0{,}00455$ м.

Приведём начальные и граничные условия, определяющие решение.

1. Начальная температура стержня

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

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

2. Температура окружающей среды $T_{oc} = 592$ K.

3. Граничные условия второго рода на торцах стержня:

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

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

где $q_1(r, -l, \tau)$ – поток (тепловыделение) на нижнем торце стержня в точке с координатой r в момент τ, Вт/м^2; $q_2(r, l, \tau)$ – поток (тепловыделение) на верхнем торце стержня в точке с координатой r в момент τ, Вт/м^2.

4. Граничные условия второго рода (условие адиабаты):

$$q_3(r, l, \tau) = 0, \quad r = 0, \quad z \in [-l, l], \tag{7}$$

где $q_3(r, l, \tau)$ – поток (тепловыделение) внутри стержня в точке с координатой r в момент τ, Вт/м^2.

5. Граничное условие третьего рода на боковой поверхности стержня [3]:

$$q_4(R_0, z, \tau) = \alpha(T(R_0, z, \tau) - T_{oc}), \quad z \in [-l, l], \tag{8}$$

где $q_4(R_0, z, \tau)$ – тепловой поток на боковой поверхности стержня, Вт/м^2; $T(R_0, z, \tau)$ – температура точек боковой поверхности стержня в момент τ, К; T_{oc} – температура окружающей среды, К; α – коэффициент теплообмена со средой, Вт/(м^2·К).

Для нахождения коэффициента α от поверхности оболочки твэла к нагреваемой воде в работе [3] используется формула расчета внешнего теплообмена в решетках твэлов. Расчет включает в себя вычисление критерия Нуссельта по зависимости:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}, \tag{9}$$

где Pr – критерий Прандтля; Re – критерий Рейнольдса; A – эмпирический коэффициент.

Эмпирический коэффициент находится следующим образом:

$$A = [0{,}0165 + 0{,}02(1 - 0{,}91/(s/d)^2)](s/d)^{0,15}, \tag{10}$$

где s – расстояние между центрами твэлов, м; d – внешний диаметр твэлов, м.

Критерий Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \omega \cdot d_г / \nu \,, \qquad (11)$$

где ω – средняя скорость теплоносителя в ячейке, м/с; $d_г$ – гидравлический диаметр регулярной треугольной ячейки твэлов, м; ν – кинематическая вязкость жидкости при заданной температуре и давлении м^2/с.

Гидравлический диаметр регулярной треугольной ячейки твэлов вычисляется так:

$$d_г = d[2(3/\pi)^{0,5}(s/d)^2 - 1], \qquad (12)$$

где d – внешний диаметр твэлов, м; s – расстояние между центрами твэлов, м.

Физические параметры берутся при температуре теплоносителя в регулярных ячейках сборки, равной среднеарифметическому значению температур теплоносителя на входе и выходе из регулярных ячеек. Формула (12) справедлива, если $1{,}06 \le s/d \le 1{,}80$; $0{,}7 \le \mathrm{Pr} \le 20$; $5000 \le \mathrm{Re} \le 5 \cdot 10^5$.

6. Граничные условия второго рода кондуктивного теплообмена на границе расчетной области гелия:

$$q_5(r, z, \tau) = \lambda_{\mathrm{He}}(T)(\partial T/\partial r), \quad r = 0{,}0038, \quad z \in [-l, l]. \qquad (13)$$

7. Граничные условия второго рода кондуктивного теплообмена на границе расчетной области оболочки твэла:

$$q_6(r, z, \tau) = \lambda_{\mathrm{Zr}}(T)(\partial T/\partial r), \quad r = 0{,}0039, \quad z \in [-l, l]. \qquad (14)$$

В исследовании используется уравнение теплопроводности при переменных теплофизических свойствах материалов твэла. Уравнение теплопроводности решается методом конечных элементов. В уравнении теплопроводности учтено, что

$$\nabla(-\lambda \nabla T) = q, \qquad (15)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T – температура, К.

Для однородного реактора удельная мощность энерговыделения по объему пропорциональна плотности потока нейтронов и может определяться выражением

$$q(r, z) = q_0 J_0(2{,}405 r/R_э)\cos(\pi z/H_э), \qquad (16)$$

где $q(r, z)$ –удельное количество тепловой энергии, выделяемое в активной зоне реактора с текущими координатами (r, z) , МВт/м^3; q_0 – удельное максимальное значение энерговыделения в центре реактора, МВт/м^3; J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; $R_э$ – эффективный радиус, м; $H_э$ – эффективная высота, м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе построена осесимметричная модель. Для уменьшения количества узлов сетки и, как следствие, ресурсов для её расчета рассматривается половина твэла. Для лучшего визуального эффекта размеры, связанные с радиусом, представлены в миллиметрах, а с высотой твэла – в метрах. Исследование проводилось на основе построенных 2D- и 3D-моделей и расчете температурных полей твэла. При этом 3D-модели являются твердотельными.

Чтобы определить, насколько улучшится теплообмен при смене топлива, проведём численный эксперимент с заменой UO_2 на металлический уран. Использование металлического урана в энергетике очень ограничено из-за его распухания во время эксплуатации, и, в связи с этим, низкой температурой использования (≤ 500°C).

Результаты численных экспериментов по оценке влияния удельной мощности на ограничения в работе твэлов приведены в табл. 1.

При внутреннем выделении энергии ограничение по использованию твэла наступает при достижении температуры разрушения топлива. Для металлического урана, имеющего более высокую теплопроводность, ограничение наступает при температуре 773 К и удельной мощности энерговыделения 200 МВт/м^3.

Таблица 1

Влияние удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива

Удельная мощность, выделяемая кубометром топлива, МВт/м^3	100	200	300	400	500	600	1000
Максимальная температура топлива UO_2, K	717,9	857,8	997,7	1137,6	1277,4	1417,3	1976,9
Максимальная температура оболочки для UO_2, K	587,4	596,7	606,1	615,0	624,8	634,1	671,5
Максимальная температура металлического урана, K	675	773,8	871	989,5	1067,4	1165,3	1556,8
Температура оболочки для металлического урана, K	587,4	596,7	606,1	615,0	624,8	634,1	671,5

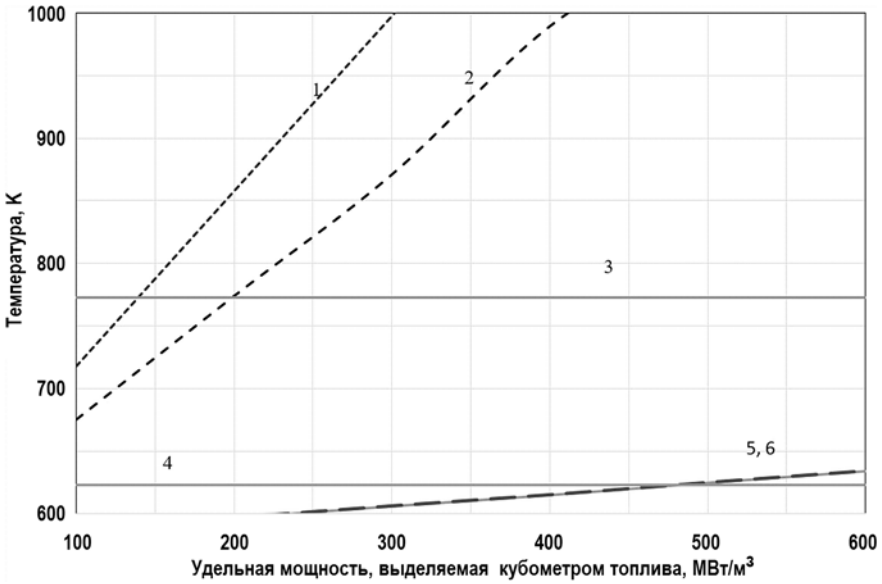

Рис. 1. Зависимость температур топлива и оболочки твэла от удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива: 1 – максимальная температура топлива UO_2; 2 – максимальная температура металлического урана; 3 – максимально допустимая температура топлива для металлического урана; 4 – максимально допустимая температура для оболочки твэла из сплава Н1; 5, 6 – максимальная температура для оболочки твэлов с топливом из UO_2 и металлического урана

Анализ рисунка 1 показывает, что замена топлива UO_2 на металлический уран никаких преимуществ не дает. Использование UO_2 позволяет в твэлах получить более высокую удельную мощность энерговыделения.

Для повышения эффективности эксплуатации твэла следует повысить эффективную теплопроводность топлива твэла, при которой учитывается два вида теплообмена: кондуктивный и радиационный. Для этого необходимо оценить влияние радиационного теплообмена внутри отверстия в топливе на температурные ограничения по максимальной температуре использования UO_2 и материала оболочки твэла.

Оценка влияния радиационного теплообмена выполнена с использованием пакета COMSOL Multiphysics. Задача его учета решается «методом встречных градиентов». Для внешних поверхностей столба топливных таблеток, поверхностей стенок топлива внутри отверстия твэла и внутренних стенок оболочки, участвующих в радиационном теплообмене, принимаем степень черноты, приближенную к абсолютно чёрному телу.

Для учета граничных условий в 3D-модели внутри отверстия и в зазоре между топливом и оболочкой используется «алгоритм радиационного теплообмена от поверхно-

сти к окружающему пространству». Окружающая среда имеет постоянную среднюю температуру T_{amb}.

Эти предположения позволяют выразить падающий тепловой поток на поверхность как

$$E_{пад} = \sigma \cdot (T_{amb})^4, \quad (17)$$

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

Для поглощённого излучающего потока теплоты от поверхности к окружающему пространству используется следующее уравнение:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_{amb})^4 - T^4], \quad (18)$$

где ε – интегральная степень черноты тела; $T = T_0$ – температура на границе (граничные условия первого рода), К.

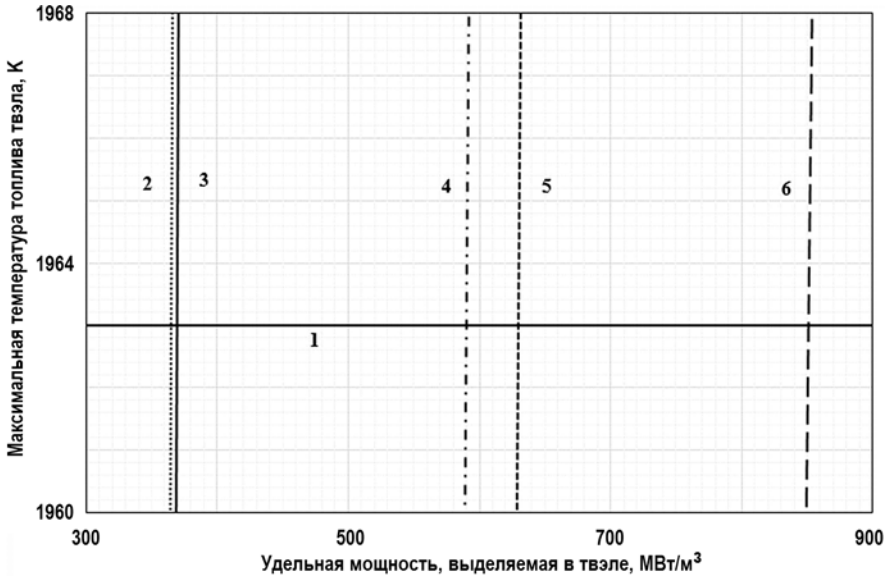

Рис. 2. Зависимость максимальных температур топлива (МТТ) твэла от удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива: 1 – максимально допустимая температура топлива для UO_2; 2 – МТТ без учета радиационного теплообмена, К; 3 – МТТ с учетом радиационного теплообмена в зазоре между топливом и оболочкой, К; 4 – МТТ для твэла с отверстием 2,3 мм без учета радиационного теплообмена, К; 5 – МТТ для твэла с отверстием 2,3 мм с учетом радиационного теплообмена, К; 6 – МТТ для твэла с отверстием 2,3 мм с учетом радиационного теплообмена, полученная на 3D-модели, К

На рисунке 2 изображена зависимость температур топлива твэла от удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива. Линии 4 и 5 соответствуют удельной мощности, при которой наступает ограничение по максимальной температуре топлива для твэла с отверстием 2,3 мм без учета и с учетом радиационного теплообмена. Процентное различие составляет 38,16 МВт/м^3 (6,1%), что подтверждает влияние радиационного теплообмена топлива твэла.

Анализ рисунка 2 показывает, что действие радиационного теплообмена нельзя полностью учесть в 2D-постановке задачи. Каждая точка будет излучать и поглощать энергию не только в направлении оси, как в 2D-модели, но часть теплового излучения будет идти и на поверхности, расположенные со смещением от направления вдоль оси.

Значения удельной мощности энерговыделения твэла с отверстием 2,3 мм с учетом радиационного теплообмена, полученные при построении 2D- и 3D-моделей, существенно отличаются. Различие составляет 222,87 МВт/м^3 (26,2%).

Результаты расчетов по влиянию диаметра отверстия на ограничение по температу-

ре топлива приведены на рис. 3, а на ограничение по температуре оболочки – на рис. 4.

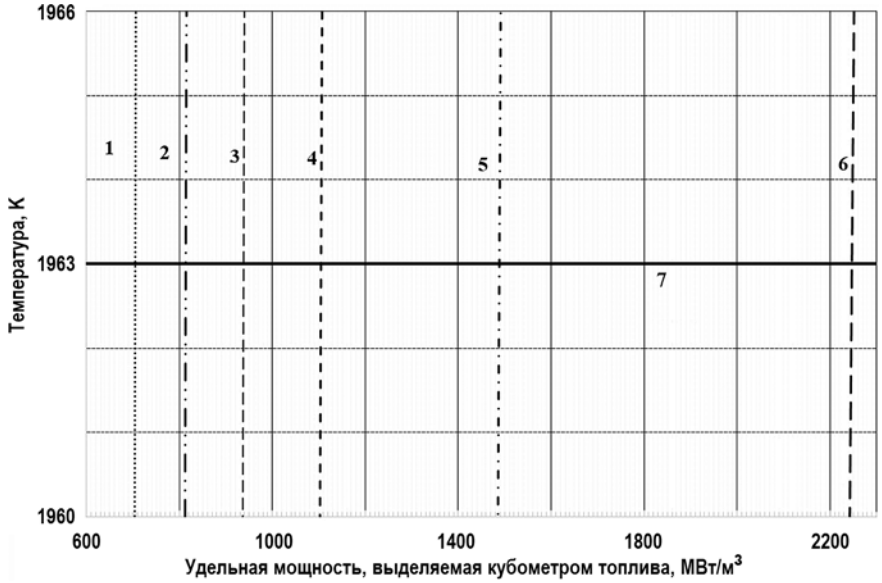

Рис. 3. Зависимости максимальных температур топлива (МТТ) твэла от удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива, полученные на 3D-модели с учетом радиационного теплообмена: 1 – МТТ для твэла без отверстия, К; 2 – МТТ для твэла с отверстием 1,5 мм, К; 3 – МТТ для твэла с отверстием 2,3 мм, К; 4 – МТТ для твэла с отверстием 3 мм, К; 5 – МТТ для твэла с отверстием 4 мм, К; 6 – МТТ для твэла с отверстием 5 мм, К; 7 – максимально допустимая температура топлива для UO_2

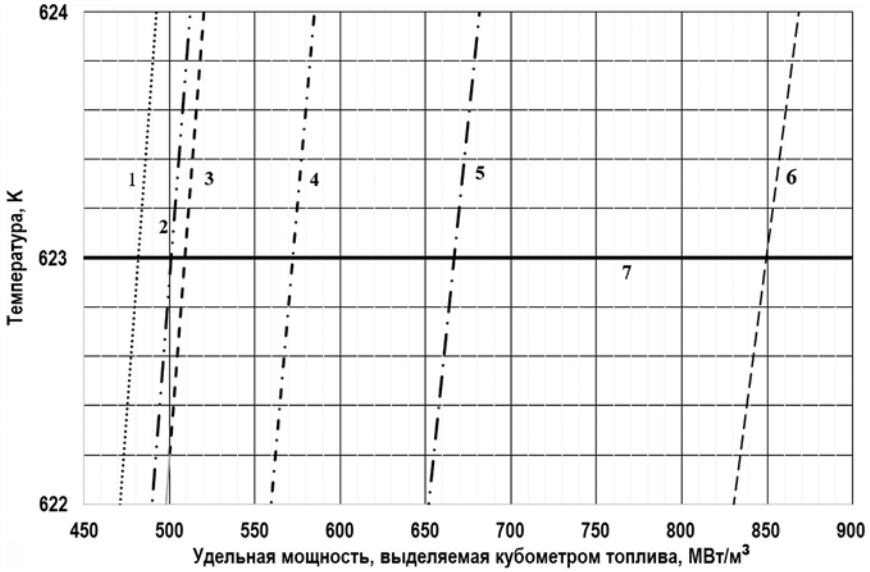

Рис. 4. Зависимости максимальных температур оболочки твэла от удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива, полученные на 3D-модели с учетом радиационного теплообмена: 1 – для твэла без отверстия, К; 2 – для твэла с отверстием 1,5 мм, К; 3 – для твэла с отверстием 2,3 мм, К; 4 – для твэла с отверстием 3 мм, К; 5 – для твэла с отверстием 4 мм, К, 6 – для твэла с отверстием 5 мм, К; 7 – максимально допустимая температура оболочки твэла

Из графиков можно сделать вывод, что при увеличении диаметра отверстия в топливных таблетках отодвигается граница ограничений по температурам топлива и оболочки твэла. Это позволяет увеличить удельную мощность твэла.

Результаты исследования влияния максимальной удельной мощности твэла $Q_{уд}$, выделяемой в кубометре топлива с учетом радиационного теплообмена в 3D-модели твэ-

ла, на различные параметры в зависимости от диаметра отверстия даны в табл. 2.

Таблица 2

Результаты исследования влияния максимальной удельной мощности твэла $Q_{уд}$, МВт/м³

Диаметр отверстия в таблетке, мм	0	1,5	2,3	3	4	5
$Q_{уд}$ по температуре топлива, МВт/м³	715	820	950	1118	1500	2275
$Q_{уд}$ по температуре оболочки, МВт/м³	434	472	509	563	668	862
Объем топлива в твэле, м³	1,67E-4	1,60E-4	1,52E-4	1,41E-4	1,21E-4	9,47E-5
Доля увеличения содержания урана-235 UO_2 в топливе для сохранения запаса энергии в твэле	1,000	1,040	1,100	1,180	1,380	1,760
$Q_{уд}$ по температуре топлива с одинаковым запасом энергии внутри твэла, МВт/м³	715,0	788,5	863,6	947,5	1087,0	1292,6
$Q_{уд}$ по температуре оболочки с одинаковым запасом энергии внутри твэла, МВт/м³	434,0	453,8	462,7	477,1	484,1	489,8

Из таблицы видно, что увеличение диаметра отверстия в топливной таблетке снижает ограничение по допустимой температуре топлива и оболочки.

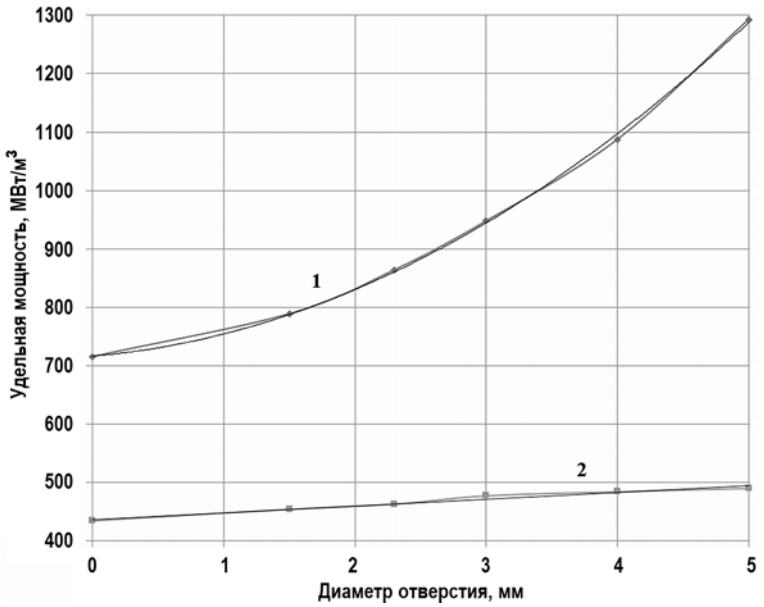

Рис. 5. Зависимость удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива и оболочке твэла, от диаметра его отверстия: 1 – максимально допустимая удельная мощность, выделяемая в топливе UO_2; 2 – максимальная удельная мощность, выделяемая в твэле, без превышения допустимой температуры его оболочки

Расчеты показывают, что за счет дополнительного обогащения ураном-235 и увеличения диаметра отверстия топливных таблеток снижается коэффициент неравномерно-

сти температурного поля по высоте активной зоны реактора при фиксированной тепловой мощности твэла [19]. В результате исследования найдены оптимальные параметры твэла, обеспечивающие минимальный коэффициент неравномерности по высоте активной зоны реактора: диаметр отверстия топливной таблетки составляет 5 мм, а доля обогащения топлива ураном-235 увеличена в 1,76 раза.

На рисунке 5 представлены зависимости удельной мощности, выделяемой в кубометре топлива и оболочке твэла, от размера диаметра его отверстия.

После аппроксимации результатов численного моделирования получены зависимости удельной мощности, выделяемой в твэле, от диаметра отверстия топливной таблетки в виде

$$q_{max} = a_1 d^2 + a_2 d + a_3. \quad (19)$$

Значения коэффициентов a_i для топлива (1) и оболочки твэла (2) на графиках рис. 5 представлены в табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициентов a_i для топлива и оболочки твэла

Коэффициент	Топливо (1)	Оболочка (2)
a_1	19,11	0
a_2	18,76	11,56
a_3	716,4	436,5

ВЫВОДЫ

Исследование влияния материалов (двуокись урана UO_2 и металлический уран U) топливных таблеток твэла, имеющих различные коэффициенты теплопроводности, на коэффициент неравномерности тепловыделения по высоте активной зоны реактора показало, что замена топлива UO_2 на металлический уран не дает никаких преимуществ.

Расчеты удельной мощности твэла подтверждают влияние радиационного теплообмена, процентное различие в удельной мощности без учета и с учетом радиационной составляющей теплообмена составляет 38,16 МВт/м^3 (6,1%).

Значения удельной мощности энерговыделения твэла с отверстием 2,3 мм с учетом радиационного теплообмена, полученные при построении 2D- и 3D-моделей, существенно отличаются в пользу 3D-модели, и различие составляет 222,87 МВт/м^3 (26,2%).

В результате исследования найдены оптимальные параметры твэла, обеспечивающие минимальный коэффициент неравномерности по высоте активной зоны реактора: диаметр отверстия топливной таблетки составляет 5 мм, а доля обогащения топлива ураном-235 увеличена в 1,76 раза.

Найдены теоретические возможности увеличения мощности ядерных реакторов за счет снижения неравномерности выделения энергии по объему.

Литература

1. *Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В.* Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.

2. *Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И.* Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: Уч. пособ. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011 – 116 с.

3. *Горбунов В.А.* Моделирование теплогидравлических процессов в ядерных реакторах в COMSOL Multiphysics: Уч. пособ. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 2019. – 180 с.

4. *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. – М.: Атомиздат, 1968, 484 с.

5. *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.

6. *Гольцев А.О., Давыдова Г.Б., Давиденко В.Д.* Влияние депрессии потока нейтронов в ячейке РБМК на величину максимальной и средней температуры топлива. // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 5-7.

7. Расчетные коды нового поколения. Электронный ресурс: http://www.ibrae.ac.ru/contents/68/ (дата доступа 20.11.2022).

8. *Велесюк А., Моргунов И.* CFD-коды: проблемы и перспективы в атомной энергетике. // Атомный эксперт. Информационно-аналитическое издание, приложение к научному журналу «Атомная энергия». – 1990. – № 8. – С.37-39.

9. *Карташов К.В., Богословская Г.П.* Проведение расчетов по оптимизации геометрических и режимных параметров ТВС реакторов ВВЭР-СКД для различных режимов эксплуатации реактора на сверхкритических параметрах воды. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2. – С. 3-11. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2012.2.12 .

10. *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. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2013.1.08 .

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

12. Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 3.5, - 2005. – 216 с. Электронный ресурс: https://extras.csc.fi/math/comsol/3.5/doc/ht/htug.pdf (дата доступа 20.11.2022).

13. *Горбунов В.А.* Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB: Уч. пособ. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2008.– 216 с.

14. *Бирюлин Г.В.* Теплофизические расчёты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. –СПб.: СПб ГУИТМО, 2006. – 76 с.

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

16. *Ильченко А.Г.* Теплогидравлика реакторных установок: Уч. пособ. –Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2005.– 160 с.

17. *Горбунов В.А., Иванова Н.Б., Лоншаков Н.А., Белов Я.В.* Разработка модели по определению температурного поля твэла в двумерной постановке задачи. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 174-184. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.15 .

18. *Dolgov A.* Effective fuel solutions using SNF reprocessing. / Proc. of the Tvel JSC International Forum «AtomExpo», Moscow, May 31, 2016.

19. *Горбунов В.А., Андрианов С.Г., Коновальцева С.С.* Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №2. – С. 23-31. DOI: https://doi.org/10.17588/2072-2672.2021.2.023-031 .

20. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. –720 с.

21. Плотность урана и его теплофизические свойства при различных температурах. Электронный ресурс: http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/metally-i-splavy/plotnost-urana-i-ego-teplofizicheskie-svojstva-pri-razlichnyh-temperaturah (дата доступа 20.11.2022).

Поступила в редакцию 24.11.2022 г.

Авторы

Горбунов Владимир Александрович, доцент, доктор технических наук
E-mail: gorbynov.w@mai.ru

Теплякова Светлана Сергеевна, аспирант
E-mail: svetlana20212120@mail.ru

Лоншаков Никита Андреевич, доцент, кандидат технических наук
E-mail: nik-lon@mail.ru

Андрианов Сергей Геннадьевич, доцент, кандидат технических наук
E-mail: asg@iff.ispu.ru

Минеев Павел Алексеевич, аспирант
E-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

UDC 621.039.517.5; 004.942

Investigation of the Influence of the Fuel Element Design Parameter on the VVER-1000 Reactor Axial Power Peaking Factor

Gorbunov V.A., Teplyakova S.S., Lonshakov N.A., Andrianov S.G., Mineev P.A.

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

ABSTRACT

The paper presents the results of a numerical study into the efficiency of the fuel element operation in the pressurized water reactor (VVER) core filled with uranium dioxide (UO_2) pellets. The investigation results were obtained from a three-dimensional simulation of the fuel element power density. The dependencies of the fuel and fuel cladding temperatures on specific power per cubic meter of fuel are compared. Uranium metal and uranium dioxide have been studied as fuel. Engineering constraints on the safe operation of fuel assemblies have been selected as the determining parameters. The paper analyzes the extent of the radiation heat transfer effects on the fuel element specific power. Equations have been obtained that reflect the dependencies of specific power per cubic meter of fuel on the size of the fuel pellet hole diameter in the maximum heat flux conditions. The COMSOL Multiphysics code, a numerical thermophysical simulation package, was used for the study. Calculations show that an additional uranium-235 enrichment with an increase in the fuel pellet hole diameter at a fixed fuel thermal power leads to a reduced reactor axial temperature field peaking factor.

Key words: VVER-1000, fuel element, fuel pellet, temperature field, specific thermal power, power peaking factor.

Gorbunov V.A., Teplyakova S.S., Lonshakov N.A., Andrianov S.G., Mineev P.A. Investigation of the Influence of the Fuel Element Design Parameter on the VVER-1000 Reactor Axial Power Peaking Factor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 2, pp. 27-40; DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2023.2.03 (in Russian).

REFERENCES

1. Kolpakov G.N., Selivanikova O.V. *Designs of Fuel Rods, Channels and Cores of Power Reactors*. Tomsk. Tomskyj Politihnichesky Universitet Publ., 2009, 118 p. (in Russian).

2. Leskin S.T., Shelegov A.S., Slobodchuk V.I. *Physical Features and Design of the VVER-1000 Reactor*. Moscow. MEPhI Publ., 2011, 116 p. (in Russian).

3. Gorbunov V.A. *Simulation of Thermohydraulic Processes in Nuclear Reactors in COMSOL Multiphysics*. Ivanovo. Ivanovsky Gosudarstvenny Energetichesky Universitet Publ., 2019, 180 p. ISBN 978-5-00062-393-0 (in Russian).

4. Chirkin V.S. *Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials*. Moskow. Atomizdat Publ., 1968, 484 p. (in Russian).

5. Perimov R.R., Sorokin G.A., Sorokina T.V. Modeling of Thermal Mechanical Reliability of the Fuel Rod with Different Variants of Change of Energy; Guideline and Temperatures. *Promyshlennaya Teplotekhnika*. 2004, v. 26, iss. 5, pp. 150-153 (in Russian).

6. Golcev A.O, Davydova G.B., Davidenko V.D. The Influence of Depression of the Neutron Flux in the RBMK Cell on the Magnitude of the Maximum and Average Fuel Temperature. *Izvestiya Tomskogo Politekhnicheskogo Universiteta*. 2009, v. 314, iss. 4, pp. 5-7 (in Russian).

7. Design Codes of New Generation. Available at: http://www.ibrae.ac.ru/contents/68/ (accessed Nov. 20, 2022) (in Russian).

8. Velesjuk A., Morgunov I. CFD's Codes: Problems and Prospects in Nuclear Power Engineering. *Atomnyj Ekspert. Appendix to Atomnaya Energiya*. 1990, no. 8, pp. 37-39 (in Russian).

9. Kartashov K.V., Bogoslovskaya G.P. Calculations for Optimization of Geometric and Regime Parameters of VVER SKD Fuel Assemblies for Different Operating Modes of the Reactor at Supercritical Water Parameters. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2012, no. 2, pp. 3-11; DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2012.2.12 (in Russian)/

10. Starkov V.A., Marihin N.Yu. Method and Program of Calculation of Stationary Temperature Field in the System of Multi Zone Cylindrical Fuel Rods. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 1, pp. 54-62; DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2013.1.08 (in Russian).

11. Gorbunov V.A. Experience in Using the Software Complex at Ivanovo State Power Engineering University n.a. V.I. Lenin. *ANSYS Advantage* (*Russkaya Redaktsiya*). 2011, no. 15, pp. 38-39 (in Russian).

12. Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 3.5.2005. 216 p. Available at: https://extras.csc.fi/math/comsol/3.5/doc/ht/htug.pdf (accessed Nov. 20, 2022) (in Russian).

13. Gorbunov V.A. *Heat Transfer Simulation in the Finite Element FEMLAB Package*. Ivanovo. Ivanovsky Gosudarstvenny Energetichesky Universitet Publ., 2008, 216 p. ISBN 978-5-89482-518-2 (in Russian).

14. Biryulin G.V. *Thermophysical Calculations in the COMSOL/FEMLAB Finite Element Package*. Saint-Petersburg,. SPb GUITMO Publ., 2006, 76 p (in Russian).

15. Dementiev B.A. *Nuclear Power Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1990, 352 p. ISBN 5-283-03836-X (in Russian).

16. Ilchenko A.G. *Thermohydraulics of Reactor Installations: a Textbook*. Ivanovo. Ivanovsky Gosudarstvenny Energetichesky Universitet Publ., 2005. 160 p. ISBN 5-89482-347-1 (in Russian).

17. Gorbunov V.A., Ivanova N.B., Lonshakov N.A., Belov Ya.V. Development of a Model for Determining the Fuel Element Temperature Field in a Two-Dimensional Formulation of the Problem. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 2. pp. 174-184; DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.15 (in Russian).

18. Dolgov A. Effective Fuel Solutions Using SNF Reprocessing. *Proc. of the Tvel JSC International Forum* «*AtomExpo*», Moscow, May 31, 2016.

19. Gorbunov V.A., Andrianov S.G., Konoval'ceva S.S. Assessment of the Effect of Radiation Heat Transfer on the Parameters of the Temperature Fields of Fuel Rods of Various Design. *Vestnik IGEU*. 2021, no 2. pp. 23-31; DOI: https://doi.org/10.17588/

2072-2672.2021.2.023-031 (in Russian).

20. Vargraftik N.B. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow. Nauka Publ., 1972. 720 p. (in Russian).

21. The Density of Uranium and its Thermophysical Properties at Various. Available at: http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/metally-i-splavy/plotnost-urana-i-ego-teplofizicheskie-svojstva-pri-razlichnyh-temperaturah (accessed Nov. 20, 2022) (in Russian).

Authors

Vladimir A. Gorbunov, Associate Professor, Dr. Sci. (Engineering)
E-mail: gorbynov.w@mai.ru

Svetlana S. Teplyakova, PhD Student
E-mail: svetlana20212120@mail.ru

Nikita A. Lonshakov, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: nik-lon@mail.ru

Sergey G. Andrianov, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: asg@iff.ispu.ru

Pavel A. Mineev, PhD Student
E-mail: pasha.mineevr@yandex.ru