

УДК 621.039

В.А. Фарафонов, А.В. Зинин, Е.И. Семёнова, А.В. Комаров

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ ТВЭЛОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР. СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОЛЬЦЕВЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложен метод значительного увеличения удельной мощности реакторной установки при одновременном повышении уровня безопасности, который заключается в использовании кольцевых тепловыделяющих элементов. Также представлены преимущества и недостатки кольцевых тепловыделяющих элементов перед традиционными тепловыделяющими сборками.

Ключевые слова: мощность, температура, топливо, теплоноситель, энтальпия, безопасность.

Введение

Последние достижения в области разработки и производства материалов оболочек ТВЭЛОВ и ядерного топлива позволяют реализовать эффективный метод значительного увеличения (до 50%) удельной мощности реакторной установки при одновременном повышении уровня безопасности. Он заключается в использовании кольцевых ТВЭЛОВ, в которых теплосъем осуществляется как с внешней, так и внутренней теплоотдающих поверхностей, причем теплоноситель внутри ТВЭЛА и снаружи движется в одном направлении. Так же применение кольцевых ТВЭЛОВ позволяет существенно снизить максимальную температуру топлива (более чем на 1000 °С при увеличенной до 150% мощности РУ). Температура топлива уменьшается, так как более двух раз снижается толщина топливного слоя, кроме того, теплопроводность UO₂ при снижении температуры растет; снизить энтальпию (запасенную энергию) топлива более двух раз, что повышает безопасность РУ при авариях с потерей теплоносителя и таким образом появляется возможность оптимизации (уменьшения стоимости) систем безопасности.

Наконец, первичный термомеханический анализ показывает существенное улучшение вибрационных характеристик ТВС. Это повышает долговечность конструкции активной зоны, что особенно важно в условиях увеличения расхода теплоносителя через активную зону (до 50%), аналогично росту мощности.



Рис. 1. Конструкция кольцевого и стержневого ТВЭЛ

Однако есть ряд проблем применения ТВЭЛОВ подобной конструкции. Необходимо определить запасы до кризиса кипения на внешней и внутренней поверхностях теплообмена.

Оптимизация ТВС должна быть направлена на выравнивание этих запасов, при этом величина запаса должна превышать значение 40%. При определении запасов следует учитывать неравномерность энерговыделения в активной зоне по высоте и радиусу. Кроме того, в процессе эксплуатации за счет разбухания и теплового расширения топлива изменяются толщины газовых кольцевых зазоров – внешний газовый зазор уменьшается, внутренний увеличивается. Это сопровождается перераспределением тепловых потоков, возрастает доля тепла, отводимого с внешней поверхности.

На рис. 1 схематично представлена конструкция кольцевого и стержневого ТВЭЛов.

Расчет кольцевого тепловыделяющего элемента реактора ВВЭР

Целью данного расчета является определение тепловой мощности кольцевого ТВЭЛа для реактора ВВЭР и сравнение ее с мощностью стержневого топливного элемента. В ходе расчета определяется распределение тепловых потоков и температур по высоте ТВЭЛа, устанавливается максимально допустимая температура топлива, проводится расчет коэффициентов запаса до кризиса теплообмена, в том числе максимально нагруженных топливных элементов. В завершении проводится расчет тепловой мощности ТВС с кольцевыми ТВЭЛами и проводится сравнение с классической ТВС со стержневыми при условии их равного объема при постановке в корпус серийного реактора установки ВВЭР-1000.

Исходные данные и методика расчета

Все расчетные параметры – тепловые потоки, температуры, параметры теплоносителя – определяются для усредненного по активной зоне и максимально нагруженного ТВЭЛа; последние из таких обозначаются индексом max. Расчет проводится для девяти точек по высоте активной зоны с координатами $z = -1,75; -1,50; -1,00; -0,50; 0,00; 0,50; 1,00; 1,50; 1,75$ м. На небольшом участке теплопередающей поверхности возможно поверхностное кипение теплоносителя, но ввиду того, что зона кипения в водо-водяных реакторах обычно мала, это явление не учитывается. Результаты расчета сведены в таблицы и представлены графически.

Приведем основные характеристики реактора, используемые в расчете:

Активная зона

Тепловая мощность реактора,

рассчитанная итерационным методом..... $Q_T = 4300$ МВт

Высота активной зоны..... $H_0 = 3,5$ м

Экстраполированная добавка к размерам зоны... $\delta = 0,08$ м

Теплоноситель

Среднее давление в активной зоне..... $p = 16$ МПа

Температура воды на входе в реактор..... $T_{вх} = 563$ К

Температура воды на выходе из реактора..... $T_{вых} = 595$ К

Геометрические характеристики ТВС

Материал оболочек ТВЭЛ Циркониевый сплав Э110

Ядерное топливо..... Диоксид урана (UO₂)

Расположение ТВЭЛов в решетке (упаковка).. Треугольное

Доля энерговыделения в ТВЭЛе..... $\kappa = 0,94$

Количество ТВС: $n_{ТВС}=163$

Количество ТВЭЛ:..... $n_{ТВЭЛ}=217$.

В табл. 1 и 2 представлены параметры, необходимые для расчетов.

Таблица 1

Параметры теплоносителя

Параметр		Т/Н
Температура насыщения	T_s, K	620,507
Теплота парообразования	$r, \text{кДж/кг}$	$9,311 \cdot 10^5$
Теплоемкость	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$9,473 \cdot 10^3$
Удельная энтальпия	$h_{уд}, 10^6 \text{ Дж/кг}$	1,65
Температура средняя	$T_{сред}, \text{K}$	579
Плотность	$\rho, \text{кг/м}^3$	715,128
Удельный объем	$\nu, 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$	0,0014
Энтальпия входа	$h_{вх}, \text{кДж/кг}$	1,283
Энтальпия выхода	$h_{вых}, \text{кДж/кг}$	1,463
Энтальпия средняя	$h_{ср}, \text{кДж/кг}$	1,369
Теплопроводность	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	0,55
Число Прандтля	Pr	1,435
Динамическая вязкость жид-	$\mu_f, 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$	8,641
Динамическая вязкость стен	$\mu_w, 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$	7,997
Кинематическая вязкость	$\nu, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	1,208

Таблица 2

Геометрические параметры ТВЭЛ и ТВС

Параметр	Значение
Размер «под ключ»	$H_{ТВС} = 0.238 \text{ м}$
Шаг решетки	$\chi = 1.1$
Наружный диаметр оболочки ТВЭЛа	$d_2 = 0.015 \text{ м}$
Толщина газовой прослойки	$\delta_{г} = 0.00005 \text{ м}$
Толщина оболочки ТВЭЛа	$\delta_{об} = 0.0006 \text{ м}$
Диаметр внутренней оболочки	$d_1 = 0.008 \text{ м}$

Теплогидравлический расчет кольцевого ТВЭЛа для реактора ВВЭР [1],[2],[3]

Расчет геометрических характеристик кольцевого ТВЭЛа

Шаг решетки

$$h_{ТВЭЛ} = d_2^{ТВЭЛ} \cdot \chi = 0,017 \text{ м.}$$

Внутренний радиус ТВЭЛа

$$r_1 = \frac{d_1^{ТВЭЛ}}{2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Наружный радиус ТВЭЛа

$$r_2 = \frac{d_2^{\text{ТВЭЛ}}}{2} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для расчета используем следующие формулы,
Внутренний и наружный диаметр наружной и внутренней оболочки соответственно:

$$d_{1,2}^{\text{ВН}} = d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}} - 2 \cdot 2\delta_{\text{об}}. \quad (1)$$

Радиус оболочки ТВЭЛа

$$r_{1,2}^{\text{ВН}} = \frac{d_{1,2}^{\text{ВН}}}{2}.$$

Наружный и внутренний диаметр сердечника

$$d_{1,2}^{\text{сер}} = d_{1,2}^{\text{ВН}} - 2\delta_r. \quad (2)$$

Средний диаметр газового зазора в ТВЭЛе

$$d_2^{\text{зазор}} = 0,5(d_2^{\text{ВН}} + d_2^{\text{сер}}). \quad (3)$$

Площадь ячейки ТВС

$$f_{\text{яч}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{H_{\text{ТВС}}}{2} \right)^2. \quad (4)$$

Площадь, занимаемая ТВЭЛом, полый трубкой, нк,

$$f_{\text{пол}} = \frac{\pi}{4} \left(n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \left(d_2^{\text{ТВЭЛ}^2} - d_1^{\text{ТВЭЛ}^2} \right) + n_{\text{нк}} d_{\text{нк}}^2 + n_{\text{тр}} d_{\text{тр}}^2 \right), \quad (5)$$

где $n_{\text{нк}}$ – количество направляющих каналов; $d_{\text{нк}}^2$ – диаметр направляющего канала;
 $n_{\text{тр}} = 1$, $d_{\text{тр}} = 0,016$ м.

Площадь прохода теплоносителя в ТВС снаружи и внутри ТВЭЛа:

$$f_{\text{прох}} = f_{\text{яч}} - f_{\text{пол}}, \quad (6)$$

$$f_{\text{прох1}} = f_{\text{прох}} - f_{\text{прох2}}, \quad (7)$$

$$f_{\text{прох2}} = f_{\text{прох}} - n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_1^{\text{ТВЭЛ}^2}. \quad (8)$$

Коэффициент разделения потоков снаружи и внутри ТВЭЛа:

$$u_2 = \frac{f_{\text{прох2}}}{f_{\text{прох}}} \quad u_1 = \frac{f_{\text{прох1}}}{f_{\text{прох}}}. \quad (9)$$

....

Таблица 3

Расчетные геометрические характеристики

Название параметра	Обозначение	Результат
1	2	3
Наружный диаметр внутренней оболочки	$d_1^{\text{ВН}}$, мм	9,2
Внутренний диаметр наружной оболочки	$d_2^{\text{ВН}}$, мм	13,8

Окончание табл. 3

1	2	3
Наружный радиус внутренней оболочки	r_1^{BH} , мм	4,6
Внутренний радиус наружной оболочки	r_2^{BH} , мм	6,9
Внутренний диаметр топливного сердечника	d_1^{cep} , мм	9,3
Наружный диаметр топливного сердечника	d_2^{cep} , мм	13,7
Наружный радиус топливного сердечника	$r_2^{\text{UO}_2}$, мм	6,85
Внутренний радиус топливного сердечника	$r_1^{\text{UO}_2}$, мм	4,65
Средний диаметр газового зазора в ТВЭЛ для наружной оболочки	$d_2^{\text{зазор}}$, мм	13,75
Средний диаметр газового зазора в ТВЭЛ для внутренней оболочки, м	$d_1^{\text{зазор}}$, мм	9,25
Площадь ячейки ТВС	$f_{\text{яч}}$, м ²	0,048
Площадь прохода т/н в ТВС	$f_{\text{прох}}$, м ²	0,02491
Площадь прохода т/н в ТВС снаружи ТВЭЛа	$f_{\text{прох1}}$, м ²	0,01
Площадь прохода т/н в ТВС снаружи ТВЭЛа	$f_{\text{прох2}}$, м ²	0,015
Коэффициент разделения потоков снаружи ТВЭЛа	u_1	0,412
Коэффициент разделения потоков внутри ТВЭЛа	u_2	0,588

Расчет коэффициентов теплоотдачи

Расход теплоносителя через активную зону, ТВС, ТВЭЛ равен:

$$G_{\text{AZ}} = \frac{Q}{h_{\text{вых}} - h_{\text{вх}}} = 2,386 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad (10)$$

$$G_{\text{ТВС}} = \frac{G_{\text{AZ}}}{n_{\text{ТВС}}} = 146,383 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \quad (11)$$

$$G_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{G_{\text{ТВС}}}{n_{\text{ТВЭЛ}}} = 8,217 \frac{\text{М}}{\text{с}}. \quad (12)$$

Скорость движения теплоносителя

$$\omega = \frac{G_{\text{ТВС}}}{f_{\text{прох}} \cdot \rho} = 146,383 \frac{\text{кг}}{\text{с}}. \quad (13)$$

Расход теплоносителя через внутреннюю и наружную стороны:

$$G_{1,2} = G_{\text{ТВЭЛ}} \cdot u_{1,2}, G_1 = 0,295 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; G_2 = 0,422 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (14)$$

$$C_t = \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,11} = 1,009.$$

Для внутреннего и наружного диаметра эквивалентный диаметр ТВЭЛа

$$d_{2\text{экв}} = d_2^{\text{ТВЭЛ}} \cdot (1,103 \cdot \chi^2 - 1) = 5,689 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (15)$$

Используя критерии Рейнольдса и Нуссельта, находим коэффициент теплоотдачи:

- для наружного диаметра оболочки ТВЭЛ, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$:

$$\alpha_2 = A \frac{\lambda}{d_{2\text{экв}}} \text{Re}_2^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4}, \quad (16)$$

где $A = 0,0165 + 0,02 \cdot (1 - 0,91 \cdot \chi^{-2}) \cdot \chi^{0,15} = 0,0215$; $\text{Re}_2^{0,8}$ – число Рейнольдса; $\text{Pr}^{0,4}$ – критерий Прандтля. Число Рейнольдса для наружной стороны

$$\text{Re}_2 = \frac{w \cdot d_{2\text{экв}}}{\nu} = 2,717 \cdot 10^5; \quad (17)$$

- для внутреннего диаметра, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$,

$$\alpha_1 = \frac{\text{Nu}_1 \cdot \lambda}{d^{\text{ТВЭЛ}}_1}, \quad (18)$$

где число Нуссельта для внутренней стенки

$$\text{Nu}_1 = 0,023 \cdot \text{Re}_1^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot C_t = 769,698; \quad (19)$$

число Рейнольдса для внутренней стороны

$$\text{Re}_1 = \frac{w \cdot d_1^{\text{ТВЭЛ}}}{\nu} = 4,776 \cdot 10^5, \quad (20)$$

λ – коэффициент теплопроводности для внутренней стенки, $\frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$.

Получаем

$$\alpha_2 = 5,981 \cdot 10^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}; \quad \alpha_1 = 5,87 \cdot 10^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Эффективные коэффициенты теплоотдачи, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$,

$$\frac{1}{\alpha_{1,2\text{эфф}} d_{1,2}^{\text{сее}}} = \frac{1}{\alpha_{1,2} (d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}} - 2\delta_{\text{корп}})} + \frac{1}{2\lambda_{Zr}} \cdot \ln\left(\frac{d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}}}{d_{1,2}^{\text{ТВЭЛ}} - \delta_{\text{корп}}}\right) + \frac{\delta}{\lambda_{Ar} d_{1,2}}, \quad (21)$$

где $\lambda_{Zr} = 21,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $\lambda_{Ar} = 0,0385 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$.

Из полученной зависимости (20) следует, что эффективный коэффициент теплоотдачи для наружного диаметра $\alpha_{1\text{эфф}} = 742,831 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Аналогично для внутреннего диаметра

$$\alpha_{2\text{эфф}} = 755,384 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}.$$

Расчет сечения с максимальной температурой и объёмного тепловыделения

На рис. 2 представлено сечение кольцевого ТВЭЛа и распределение температур в этом сечении.

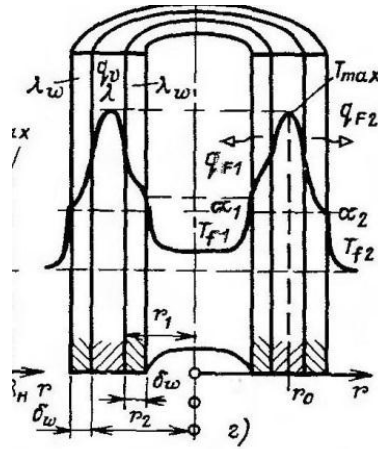


Рис. 2. Сечение кольцевого ТВЭЛ

Принимаемы значения температуры $T_{срре} = 873\text{К}$.

Коэффициент теплопроводности топлива

$$\lambda_{UO_2} = \frac{4 \cdot 10^3}{130 + \left(\frac{T_{сее}}{K}\right)} + 3.4 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{T_{сее}}{K}\right)^4 = 4,008 \frac{\text{Вт}}{\text{МК}}. \tag{22}$$

Координата сечения, где температура максимальна, определяется формулой

$$r_0 = \sqrt{\frac{\left[\frac{r_{1UO_2}}{\alpha_{1ЭКВ}} + \frac{r_{2UO_2}}{\alpha_{2ЭКВ}} + \frac{1}{\lambda_{UO_2}} \cdot (r_{2UO_2}^2 - r_{1UO_2}^2) \right]}{\left(\frac{1}{\alpha_{1ЭКВ} r_{1UO_2}} + \frac{1}{\alpha_{2ЭКВ} r_{2UO_2}} + \frac{1}{\lambda_{UO_2}} \cdot \ln\left(\frac{r_{2UO_2}}{r_{1UO_2}}\right) \right)}} = 6,111 \text{ мм}. \tag{23}$$

Максимальная температура при $r = r_0$ равна

$$T_{\text{max}} = T_{\text{срре}} + \frac{q_v \cdot r_{1UO_2}}{2\alpha_{1ЭКВ}} \cdot \left(-1 + \frac{r_0^2}{r_{1UO_2}^2}\right) + \frac{q_v}{4\lambda_{UO_2}} \cdot \left[r_0^2 \cdot \ln\left(\frac{r_0^2}{r_{1UO_2}^2}\right) - (r_0^2 - r_{1UO_2}^2) \right]. \tag{24}$$

Из (24) следует, что объёмная плотность тепловыделения ТВЭЛа $q_v = 4,648 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$.

Тепловая мощность единичного ТВЭЛа, кВт, определяется формулой

$$Q_{\text{ТВЭЛ}} = V_{\text{сее}} q_v, \tag{25}$$

где объём топливного сердечника

$$V_{\text{сее}} = \pi \frac{d_{2\text{сее}}^2}{4} H_0 - \pi \frac{d_{1\text{сее}}^2}{4} H_0 = 0,00028 \text{ м}^3, \tag{26}$$

$$Q_{\text{ТВЭЛ}} = 129.304 \text{ кВт},$$

тогда найдем тепловую мощность ТВС, кВт,

(27)

$$Q_{\text{ТВС}} = n_{\text{ТВЭЛ}} \cdot Q_{\text{ТВЭЛ}}.$$

Получаем $Q_{\text{ТВЭЛ}} = 129,304 \text{ кВт}$, $Q_{\text{ТВС}} = 26380 \text{ кВт}$, тогда тепловую мощность активной зоны можно найти по формуле

$$Q_{\text{аз}} = n_{\text{ТВС}} \cdot Q_{\text{ТВС}} = 4,3 \cdot 10^3 \text{ МВт}. \quad (28)$$

Тепловую мощность, передаваемую на внутреннюю и наружную стороны ТВЭЛа определяем из соотношения

$$Q_{\text{кол}} = Q_1 + Q_2,$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\left(\frac{d_2^{\text{сеп}}}{2}\right)^2 - r_0^2}{r_0^2 - \left(\frac{d_1^{\text{сее}}}{2}\right)^2}, \quad (29)$$

где $Q_1 = 80,374 \text{ кВт}$ - тепловая мощность, передаваемая на внутреннюю сторону; $Q_2 = 48,929 \text{ кВт}$ - тепловая мощность, передаваемая на наружную стороны

Расчет коэффициента запаса до кризиса теплообмена кольцевого ТВЭЛа

Оптимизация ТВС должна быть направлена на выравнивание этих запасов, при этом величина запаса должна превышать значение 1,30. При определении запасов следует учитывать неравномерность энерговыделения в активной зоне по высоте и радиусу. Кроме того, в процессе эксплуатации за счет разбухания и теплового расширения топлива изменяются толщины газовых кольцевых зазоров – внешний газовый зазор уменьшается, внутренний увеличивается. Это сопровождается перераспределением тепловых потоков, возрастает доля тепла, отводимого с внешней поверхности.

Проведем расчет тепловых потоков и параметров теплоносителя по высоте ТВЭЛа в девяти точках с координатами $z = -1,75; -1,5; -1; 0,5; 0; 0,5; 1; 1,5; 1,75$.

Коэффициент неравномерности энерговыделения по высоте равен $K_z = 1.5$. Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны принимаем равным $K_v = 2,8$.

Тепловой поток на ТВЭЛе рассчитывается по формуле

$$q_{l1} = \frac{K_z Q_1}{H_0} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}} \right]. \quad (30)$$

Значения линейных тепловых потоков в расчетных точках по высоте активной зоны определяются по следующим формулам для внутренней и наружной стороны соответственно:

$$q_l(z) = q_l \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right),$$

$$q_{l\text{max}}(z) = q_{l\text{max}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right). \quad (31)$$

Распределение тепловой нагрузки на единицу поверхности ТВЭЛа:

$$q_s(z) = k \frac{q_l(z)}{\pi \cdot d_{\text{ТВЭЛ}}},$$

$$q_{s\max}(z) = k \frac{q_{l\max}(z)}{\pi d_{\text{ТВЭЛ}}}. \quad (32)$$

Тепловой периметр для внутренней и наружной стороны $\Pi t = \pi(n_{\text{ТВЭЛ}} d_{\text{ТВЭЛ}})$ где $\Pi t_2 = 5,127$ м - для наружной стороны; $\Pi t_1 = 9,613$ м - для внутренней стороны.

Распределение энтальпии теплоносителя по высоте ТВЭЛа для каждого участка определяется формулой

$$h(z) = h_{\text{вн}} + \frac{q_l}{G_{\text{ТВЭЛ}}} \cdot \frac{H}{\pi} \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi H_0}{2H}\right) + \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right) \right], \quad (33)$$

где $G_{\text{ТВЭЛ}}$ – расход теплоносителя через ТВЭЛ; q_l – линейный тепловой поток; H_0 – высота АЗ; H – экстраполированная высота.

Распределение относительных энтальпий по высоте ТВЭЛа

$$x_{1,2}(z)_{\text{реал}} = \frac{h_{1,2}(z) - h_{\text{вод}}}{rS}. \quad (34)$$

Распределение относительных энтальпий по высоте ТВЭЛа для внутренней и наружной стороны

$$x_{1,2}(z)_{\text{реал_max}} = \frac{h_{1,2}(z)_{\text{max}} - h_{\text{вод}}}{rS}.$$

Тепловой диаметр пучка ТВЭЛ в ТВС $Dt = \frac{4f_{\text{прох1,2}}}{\Pi t_{1,2}}$, где $Dt_1 = 8$ мм – для внутренней стороны; $Dt_2 = 6,1$ мм – для наружной.

Критический тепловой поток

$$q_{\text{кр}}(z) = \frac{\left(1 - \frac{X_{1,2}(z)}{3,5}\right)^{1,3}}{320 \cdot \left(1 + \frac{H_0}{3,54}\right)} \rho_{\text{вод}} rS \left[gDt_{1,2} (gAS)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} Re_{1,2\text{кр}}^{\frac{1}{5}} Pr_{\text{вод}}^{\frac{1}{3}}, \quad (35)$$

где $Re_{1,2\text{кр}} = \frac{wDt_{1,2}\rho_{\text{ср}}}{\mu_{\text{вод}}}$ – число Рейнольдса для критических тепловых потоков для q_1 и q_2 соответственно

$$X(z) = x(z)_{\text{реал}} \left[\frac{[Dt(w\rho_{\text{ср}})^2]^{\frac{1}{5}}}{\sigma S \rho_{\text{вод}}} \right]^{\frac{1}{5}}.$$

После указанных расчетов можно определить коэффициенты запаса до кризиса теплообмена по формуле

$$k_{\text{зап}}(z) = \frac{q_{\text{кр}}(z)}{q_s(z)}. \quad (36)$$

Распределение значений критических тепловых потоков и коэффициентов запаса до кризиса теплообмена приведено в табл. 4.

Таблица 4

Значения критического и поверхностного теплового потока q_1 и q_2 , коэффициента запаса до теплообмена

z, м	-1,75	-1,50	-1,00	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	1,75
q_{s1} , кВт/м ²	88,4	360,1	842,2	1171,5	1288,3	1171,5	842,2	360,1	88,4
$q_{кр1}$, кВт/м ²	3466,57	3433,07	3252,67	2955,64	2601,99	2259,12	1987,05	1828,55	1799,67
$q_{кр1}^{max}$, кВт/м ²	6495,59	6431,44	6086,02	5517,56	4841,15	4185,91	3666,49	3364,14	3309,07
q_{s1}^{max} , кВт/м ²	165	672,1	1572	2186,8	2404,9	2186,8	1572	672,1	165
$K_{зап1}$	39,215	9,534	3,862	2,523	2,02	1,928	2,359	5,078	20,359
$K_{зап1}^{max}$	39,365	9,569	3,871	2,523	2,013	1,914	2,332	5,005	20,054
q_{s2} , кВт/м ²	53,8	219,2	325,7	453	498,3	453	325,7	139,3	34,2
q_{s2}^{max} , кВт/м ²	100,5	409,2	957	1331,2	1464	1331,2	957	409,2	100,5
$q_{кр2}$, кВт/м ²	2889,56	2877,96	2815,22	2710,86	2584,62	2459,79	2358,67	2298,78	2287,77
$q_{кр2}^{max}$, кВт/м ²	2613,56	2594,79	2493,51	2326	2125,1	1928,49	1770,9	1678,31	1661,37
$K_{зап2}$	53,696	13,13	5,491	3,801	3,296	3,449	4,601	10,487	42,513
$K_{зап2}^{max}$	26,018	6,342	2,606	1,747	1,452	1,449	1,85	4,102	16,539

На рис. 3 представлены графики зависимости тепловых потоков для внутренней и наружной стороны ТВЭЛа в зависимости от координаты.

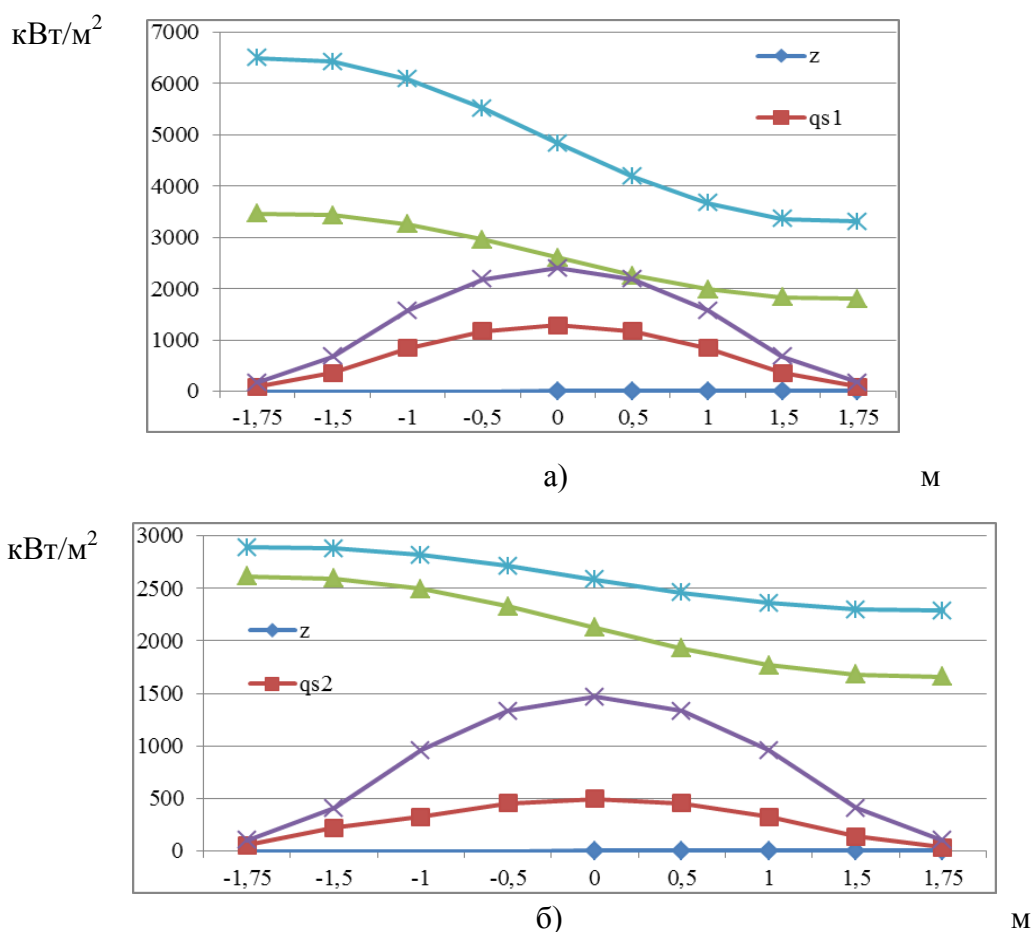


Рис. 3. График зависимости тепловых потоков:
а – для внутренней стороны ТВЭЛ от координаты; б – для наружной

Выводы

При проведении расчета были получены следующие результаты:

1. Идеей нашего расчета являлось сравнение мощностей кольцевого и стержневого ТВЭЛов для реактора ВВЭР. Тепловая мощность единичного кольцевого ТВЭЛов $Q_{ТВЭЛкол} = 129$ кВт. Для сравнения тепловая мощность стержневого ТВЭЛа в серийном реакторе ВВЭР-1000 $Q_{ТВЭЛстер} \approx 60$ кВт. Увеличение тепловой мощности достигается за счет двустороннего отвода тепла в ТВЭЛах кольцевого типа.

2. Тепловая мощность ТВС с кольцевыми топливными элементами $Q_{ТВС} = 26380$ кВт, что превышает тепловую мощность ТВС-2М в серийном реакторе ВВЭР-1000 $Q_{ТВС-2М} \approx 18400$ кВт.

Параметры ТВС подобраны с условием равенства ее габаритных размеров серийной ТВС-2М. Следует отметить увеличение плотности решетки ТВЭЛов, уменьшение их количества с 312 в ТВС-2М до 217 в ТВС с кольцевыми топливными элементами. Причина подобных мер – увеличение внешнего диаметра ТВЭЛа с 9,1 мм в стержневых до 15 мм в кольцевых.

3. Наблюдается так же увеличение тепловой мощности активной зоны с использованием ТВС с кольцевыми топливными элементами $Q_{АЗкол} = 4300$ МВт. Для сравнения тепловая мощность серийного реактора установки ВВЭР-1000 $Q_{АЗ} \approx 3000$ МВт. При этом объемы активных зон для обеих установок равны, следовательно, возможно использование серийных реакторов с применением в них кольцевых ТВЭЛов. Увеличение мощности составляет $\Delta Q = 43\%$.

4. Следует отметить увеличение скорости потока теплоносителя в активной зоне с топливными элементами кольцевого типа, возникающее как следствие увеличения тепловой мощности активной зоны, $V_{АЗкол} = 8,217$ м/с.

5. Полученные запасы до кризиса теплообмена свидетельствуют о возможности использовании ТВЭЛов предложенного типа. В результате проверочного расчета были получены минимальные коэффициенты запаса для максимально нагруженных топливных элементов по внешнему и внутреннему диаметру $K_{запл}^{max} = 2,01$; $K_{запл}^{max} = 1,45$.

6. Использование ТВС с кольцевыми топливными элементами позволяет существенно уменьшить количество делящегося топлива в активной зоне уменьшить его температуру, тем самым увеличив теплопроводность, что в повышает безопасность реакторной установки. В полученной активной зоне достигнуто сокращение объемов оксида урана на 40 %

7. Использование кольцевых ТВЭЛов может быть эффективно в установках с кипением теплоносителя и выработкой перегретого пара – в реакторах со сверхкритическими параметрами или в прямом газотурбинном цикле. Так же можно рекомендовать оребрение или навивку внутренней и внешней поверхности ТВЭЛа, ввод во внутреннюю полость топливных элементов шнековых вставок. Данные мероприятия проводятся с целью интенсификации теплообмена и увеличения тепловой мощности топливных сборок и реактора в целом.

Библиографический список

1. **Афров, А.М.** ВВЭР-1000: Физические основы, эксплуатация, ядерное топливо, безопасность / А.М. Афров [и др.]. – М.: Логос, 2006. – 504 с.
2. **Кириллов, П.Л.** Справочник по теплогидравлическим расчётам / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.

3. **Дмитриев, С.М.** Краткий курс тепломассообмена: учеб. пособие / С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2008. – 144 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.06.2015*

V. A. Farafonov, A. V. Zinin, E. I. Semenov, A. V. Komarov

**DETERMINATION OF THERMAL POWER ANNULAR FUEL ELEMENTS.
COMPARISON OF THE THERMAL POWER OF THE CORE USING THE ANNULAR
AND ROD FUEL ELEMENTS**

Nizhniy Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev

Purpose: This article contains a calculation of power heat of annular fuel rods for VVER-type reactor. The calculation was carried out with the aim of substantiating theoretically the increasing of power heat due to the replacement pin-type fuel assembly with fuel assembly with annular fuel rods.

Design/methodology/approach: Fuel assemblies are formed in accordance with the geometric parameters of TVS-A at using similar materials. The calculation was carried out using classical coolant temperature and isotopic composition of the fuel for such type of reactors.

Originality/value: The originality of this article is to identify the benefits of the annular fuel rods in VVER reactors.

Key words: power, temperature, fuel, coolant, enthalpy, safety.