

УДК 621.039

А.В. Комаров, В.А. Фарафонов

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА
КОЛЬЦЕВОГО ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА
ДЛЯ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведён теплогидравлический расчёт кольцевого тепло выделяющего элемента для реакторов с натриевым теплоносителем, выбран оптимальный размер внутреннего диаметра, при котором расходы и скорости теплоносителя с наружной и внутренней стороны равны.

Ключевые слова: температура, топливо, теплоноситель, оболочка, сердечник.

Реакторы на быстрых нейтронах позволяют осуществлять расширенное воспроизводство ядерного топлива, что радикально решает проблему энергообеспечения АЭС, так как открывается возможность дальнейшего роста ядерной энергетики практически без ограничения со стороны топливных ресурсов.

Обеспечение высокой эффективности и надежности в работе быстрых реакторов – важная проблема, решение которой в значительной степени определяется уровнем теплофизического обоснования реакторов.

Особенности условий работы быстрых реакторов (высокие нейтронные и тепловые потоки, большие выгорания и давления газообразных продуктов деления в ТВЭлах, высокие температуры топлива и оболочки), особенности физики и геометрии активной зоны, значительные неопределенности в параметрах выдвигают задачу более глубокого проникновения в суть теплофизических процессов, протекающих в реакторах, и познания новых явлений, отвечающих современному уровню знаний в области теплофизики реакторов как науки. Межканальный гидродинамический и тепловой обмен, переменное энерговыделение и начальные тепловые участки, деформированные решетки ТВЭлов и нестандартные каналы, несимметричные тепловые нагрузки и оребренные системы ТВЭлов – далеко не полный перечень вопросов, выдвигаемых в настоящее время практикой реакторостроения и имеющих решающее значение при теплофизическом обосновании быстрых реакторов.

Учет перечисленных факторов в теплогидравлическом расчете делает его весьма сложной задачей. Среди требований к теплогидравлическому расчету – большая информативность, комплексность, высокая достоверность результатов, прежде всего, по локальным гидродинамическим и тепловым характеристикам: с одной стороны, большие запасы по параметрам теплоносителя недопустимы (ограничиваются мощностью и КПД установки), с другой – превышение локальных температур сверх допустимых пределов может обусловить выход реактора из строя.

Представленный материал по теплогидравлическому расчету ТВС быстрых реакторов учитывает специфику гидродинамики и теплообмена в активных зонах быстрых реакторов и направлен на решение перечисленных вопросов.

В данных реакторах предлагается использовать кольцевой тепло выделяющий элемент и выбрать оптимальный размер его внутреннего диаметра с применением вытеснителей.

Теплогидравлический расчет реакторов типа БН [2]

Теплогидравлический расчет необходим для обоснования проекта ядерной энергетической установки, ее теплотехнической оптимизации и повышения теплотехнической надежности. При теплогидравлическом расчете определяют распределение расхода теплоносителя по ТВС

активной зоны реактора, распределение давления по контуру циркуляции, температуры в элементах реактора, а также параметры оборудования первого контура установки.

В связи с невозможностью в данном проекте учесть всю сложность и многообразие элементов, далее во многих случаях вводятся упрощающие предпосылки и усредненные коэффициенты, которые, вообще говоря, должны быть разными для разных реакторов. Использование этих коэффициентов позволяет в какой-то мере учесть сложность конструкции, но, безусловно, делает расчеты неточными.

Исходные данные и методика расчета

Все расчетные параметры – тепловые потоки, температуры, параметры теплоносителя – определяются для центральной тепловыделяющей сборки, работающей в самых тяжёлых условиях. Расчет проводится для девяти точек по высоте активной зоны с координатами $z = -0,50; -0,37; -0,25; -0,12; 0,00; 0,12; 0,25; 0,37; 0,50$ м. Результаты расчета сведены в таблицы.

Приведем основные характеристики реактора, используемые в расчете:

Активная зона:

- тепловая мощность реактора $Q_T = 2100$ МВт;
- высота активной зоны $H_0 = 0,998$ м;
- экстраполированная добавка к размерам зоны $\delta = 0,1996$ м.

Теплоноситель:

- температура воды на входе в реактор $t_{вх} = 374^\circ\text{C}$;
- температура воды на выходе из реактора $t_{вых} = 547^\circ\text{C}$.

Тепловыделяющая сборка:

- материал оболочки твэла Нержавеющая сталь;
- ядерное топливо Диоксид урана (UO_2);
- расположение твэлов в решетке (упаковка) Треугольная;
- доля энерговыделения в твэле $\kappa = 0,94$;
- количество ТВС $n_{\text{ТВС}}=340$;
- количество твэлов $n_{\text{ТВЭЛ}}=127$;
- наружный диаметр твэла $d_2 = 9,1$ мм;
- внутренний диаметр твэла $d_1 = 5,1$ мм;
- диаметр дистанцирующей проволоки $d_{\text{пр}} = 1,05$ мм;
- диаметр вытеснителя внутри твэла $d_{\text{в}} = 1,05$ мм;
- диаметр вытеснителя у периферийных твэлов $d_{\text{вп}} = 1,8$ мм;
- количество вытеснителей: $n_{\text{вп}}=24$;
- относительный шаг твэла $\chi=1,17$.

Теплогидравлический расчет кольцевого твэла для реактора БН-800

Геометрические характеристики активной зоны ТВЭЛ и ТВС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики твэла и ТВС

Параметр		Наружная сторона твэла	Внутренняя сторона твэла
1		2	3
Диаметр оболочки твэла	$d_{\text{об}}$, мм	8,3	5,9
Диаметр топливного сердечника твэла	$d_{\text{с}}$, мм	8,1	6,1

Окончание табл. 1

1		2	3
Проходное сечение ячейки	$S_{яч}, м^2$	0,04951	
Проходное сечение теплоносителя	$S_{яч}, м^2$	0,025	0,024
Гидравлический периметр сечения для прохода теплоносителя	$\Pi_r, м$	4,183	2,432
Гидравлический диаметр сечения для прохода теплоносителя	$d_r, м$	0,002471	0,00403
Тепловой периметр сечения для прохода теплоносителя	$\Pi_r, м$	4,048	2,432
Тепловой периметр оболочки твэла	$\Pi_{об}, м$	3,310	1,714
Тепловой периметр газового зазора твэла	$\Pi_з, м$	3,230	2,433

Расчет тепловых потоков и параметров теплоносителя по высоте активной зоны [2],[3]

Коэффициенты неравномерности энерговыделения (по стандартным проектам БН) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты неравномерности энерговыделения

Коэффициенты	БН-350	БН-600	БН-800	БН-1600
Коэффициент неравномерности по радиусу K_r	1,30	1,23	1,23	1,21
Коэффициент неравномерности по высоте K_z			1,22	

Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны

$$K_V = K_r K_z = 1,23 \cdot 1,22 = 1,5. \quad (1)$$

Высота активной зоны с учетом экстраполированной добавки, м,

$$H = H_0 + 2\delta = 0,998 + 2 \cdot 0,1996 = 1,3972. \quad (2)$$

Расход теплоносителя через активную зону, кг/с,

$$G = \frac{Q_T}{C_p \Delta t} = \frac{2100}{1,272 \cdot (547 - 374)} = 9894. \quad (3)$$

Средний расход теплоносителя через одну ТВС, кг/с,

$$G_{ТВС} = \frac{G_{корп}}{n_{ТВС}} = \frac{9894}{340} = 29,1. \quad (4)$$

Доля мощности, выделяемая в активной зоне от общей тепловой мощности реактор Q_T ,

$$\eta_{AZ} = 0,9$$

Мощность активной зоны, кВт,

$$Q_{AZ} = \eta_{AZ} Q_T = 0,9 \cdot 2100 = 1890.$$

Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора в расчете на средненагруженный твэл, кВт/м,

$$q_{l,0} = \frac{Q_{AZ}}{NH_0} K_z = \frac{1898 \cdot 10^3}{340 \cdot 0,998} \cdot 1,22 = 6795. \quad (5)$$

В самых тяжелых условиях работает центральная кассета. Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора в расчете на максимально нагруженный твэл, кВт/м,

$$q_{l,0}^{\max} = \frac{Q_T}{NH_0} K_V = \frac{2100 \cdot 10^3}{340 \cdot 1,025} \cdot 1,5 = 9038. \quad (6)$$

В центральной кассете выбираем центральный твэл и разбиваем его на восемь участков. Предполагается, что распределение по высоте подчиняется косинусоидальному закону

$$q_l(z) = q_{l,0}^{\max} \cos \frac{\pi z}{H}. \quad (7)$$

В табл. 3 приведены численные значения тепловых потоков, приходящихся на одну ТВС, усреднённые по высоте.

Таблица 3

Значения тепловых потоков для тепловыделяющей сборки

z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
q _l , кВт/м	3631	5572	7078	8032	8358	8032	7078	5572	3631

Расчет расходов теплоносителя, омывающего наружную и внутреннюю стороны твэла [4]

Расход теплоносителя через внутреннюю и наружную стороны, кг/с,

$$G_{1,2} = G u_{1,2}. \quad (8)$$

Коэффициенты разделения потоков снаружи и внутри твэла

$$u_2 = \frac{S_{\text{яч}2}}{S_{\text{яч}}}; \quad u_1 = \frac{S_{\text{яч}1}}{S_{\text{яч}}}, \quad (9)$$

где $S_{\text{яч}1,2}$ - площади прохода теплоносителя с наружной и внутренней стороны твэла; $S_{\text{яч}}$ - общая площадь прохода теплоносителя.

Получаем

$$u_2 = 0,505, \quad u_1 = 0,495, \quad G_2 = 14,694 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad G_1 = 14,406 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Расчет тепловых потоков для внутренней и наружной стороны твэла [3]

Теплоноситель общим расходом G поступает на вход в канал с температурой T_1 , омывает кольцевой твэл как внутри, так и снаружи и на выходе из твэла после смещения имеет температуру T_2 . Поскольку теплоотвод идёт в обе стороны, внутри топливного сердечника устанавливается нейтральная поверхность, представляющая собой для любого сечения окружность радиусом r_0 . При этом тепловой поток разделяется на два: $q_{l1}(x)$ - направлен внутрь и $q_{l2}(x)$ - направлен наружу.

Если предположить, что объёмное тепловыделение по сечению кольцевого твэла постоянно, то получаем

$$q_{l1}(z) = q_l(z) \cdot \left(\frac{r_0^2(z) - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \right) \quad (10)$$

$$q_{l2}(z) = q_l(z) \cdot \left(\frac{-r_0^2(z) + \left(\frac{d_2}{2}\right)^2}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \right).$$

Вполне очевидно, что сумма тепловых потоков $q_{11}(z)$ и $q_{12}(z)$ равна общему тепловому потоку $q_l(z)$:

$$q_l(z) = q_{11}(z) + q_{12}(z). \tag{11}$$

Результаты расчётов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения тепловых потоков для наружной и внутренней стороны

z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
q_{11} , кВт/м	1743,8	2676,2	3399,6	3857,6	4014,3	3857,6	3399,6	2676,2	1743,8
q_{12} , кВт/м	1887,0	2896,0	3678,8	4174,4	4344,0	4174,4	3678,8	2896,0	1887,0
r_0 , мм	3,654	3,653	3,653	3,652	3,652	3,651	3,650	3,649	3,648

Определение теплофизических параметров теплоносителя [2]

Находим температуру теплоносителя в следующей точке по уравнениям:

$$t_1(z) = t_{1вх} + \frac{q_{l,1} \Delta z}{G_1 C_p} + \Delta t_{Н.Т.Э}, \tag{12}$$

$$t_2(z) = t_{2вх} + \frac{q_{l2} \cdot \Delta z}{G_2 \cdot C_p} + \Delta t_{Н.Т.Э}.$$

Величину $\Delta t_{Н.Т.Э}$ принимаем 4°C [6].

Полученные значения энтальпий и теплофизические параметры теплоносителя, омывающего внутреннюю стенку твэла, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Теплофизические параметры теплоносителя, омывающего внутреннюю стенку твэла

Координата расчетной точки, z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
Температура, t_{t1} , $^\circ\text{C}$	378,0	396,2	419,4	445,6	473,0	499,2	522,4	540,6	552,5
Плотность, ρ_1 , кг/м ³	861,7	859,3	854,6	847,4	840,3	833,1	828,3	823,4	821,0
Теплопроводность, λ_1 , Вт/м·К	72,16	71,68	70,71	69,25	67,79	66,34	65,37	64,4	63,91
Кинематическая вязкость, ν_1 , 10^{-8} м ² /с	33,64	33,15	32,25	31,04	29,99	29,06	28,51	27,99	27,75
Число Прандтля, $Pr_1 \cdot 10^{-2}$	0,517	0,5107	0,493	0,4846	0,4724	0,4622	0,4567	0,4519	0,4477

Полученные значения энтальпий и теплофизические параметры теплоносителя, омывающего наружную стенку твэла, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Теплофизические параметры теплоносителя, омывающего наружную стенку твэла

Координата расчетной точки, z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
Температура, t_{t2} , $^\circ\text{C}$	378,0	395,9	418,6	444,3	471,1	496,8	519,5	537,4	549,0
Плотность, ρ_2 , кг/м ³	861,7	859,3	854,6	847,4	840,3	833,1	828,3	823,4	821,0
Теплопроводность, λ_2 , Вт/м·К	72,16	71,68	70,71	69,25	67,79	66,34	65,37	64,4	63,91
Кинематическая вязкость, ν_2 , 10^{-8} м ² /с	33,64	33,15	32,25	31,04	29,99	29,06	28,51	27,99	27,75
Число Прандтля, $Pr_2 \cdot 10^{-2}$	0,517	0,5107	0,493	0,4846	0,4724	0,4622	0,4567	0,4519	0,4477

Расчет среднего коэффициента теплоотдачи [5]

Средние значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha(z)$ на участках вокруг расчетных точек могут быть рассчитаны по формулам:

- для наружной стенки

$$\text{Nu}_2(z) = 24,15 \cdot \lg(-8,12 + 12,76\chi - 3,65\chi^2) + 0,0174 \cdot (1 - \exp(-6 \cdot (\chi - 1))) \cdot (\text{Pe}_2(z) - 200)^{0,9}; \quad (13)$$

- для внутренней стенки

$$\text{Nu}_1(z) = 5 + 0,025 \cdot (\text{Pe}_1(z))^{0,8}, \quad (14)$$

где χ – относительный шаг твэлов; $\text{Nu}_1(z)$, $\text{Nu}_2(z)$ – средние на расчетных участках значения чисел Нуссельта; $\text{Pe}_1(z)$, $\text{Pe}_2(z)$ – критерий Пекле:

$$\text{Pe}_{1,2}(z) = \text{Pr}_{1,2}(z) \cdot \text{Re}_{1,2}(z). \quad (15)$$

Для чисел Нуссельта и Рейнольдса имеют место соотношения:

$$\text{Nu}(z) = \frac{\alpha(z)d_r}{\lambda(z)}; \quad \text{Re}(z) = \frac{w(z)d_r}{\nu(z)}; \quad w(z) = \frac{G_i}{s_{\text{яч}}\rho(z)}, \quad (16)$$

где $w(z)$ – скорость теплоносителя в расчетных точках.

Значения коэффициентов теплоотдачи

$$\alpha(z) = \frac{\lambda(z)}{d_r} \cdot \text{Nu}(z). \quad (17)$$

Расчётные скорости теплоносителя, чисел Рейнольдса, Нуссельта, Пекле, а также коэффициент теплоотдачи занесём в табл. 7.

Таблица 7

Сводная таблица

z , м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
w_1 , м/с	6,821	6,840	6,878	6,936	6,995	7,055	7,096	7,138	7,159
w_2 , м/с	6,821	6,840	6,878	6,936	6,995	7,055	7,096	7,138	7,159
Re_1 , 10^5	0,620	0,631	0,652	0,683	0,713	0,742	0,761	0,779	0,788
Re_2 , 10^5	0,501	0,510	0,527	0,552	0,576	0,600	0,615	0,630	0,637
Pe_1	320,365	322,036	321,307	330,933	336,717	342,958	347,386	352,204	352,978
Pe_2	258,996	260,347	259,758	267,540	272,216	277,262	280,841	284,737	285,362
Nu_1	5,253	5,254	5,253	5,259	5,263	5,267	5,270	5,273	5,273
Nu_2	10,604	10,694	10,655	11,170	11,476	11,804	12,036	12,286	12,326
α_1 , кВт/м ² К	153,416	152,426	150,350	147,416	144,407	141,423	139,428	137,437	136,403
α_2 , кВт/м ² К	309,732	310,278	304,959	313,080	314,883	316,960	318,452	320,264	318,865

Расчет температурного поля твэлов [3],[5]

На рис. 1 представлен разрез твэла и распределение поля температур в нем.

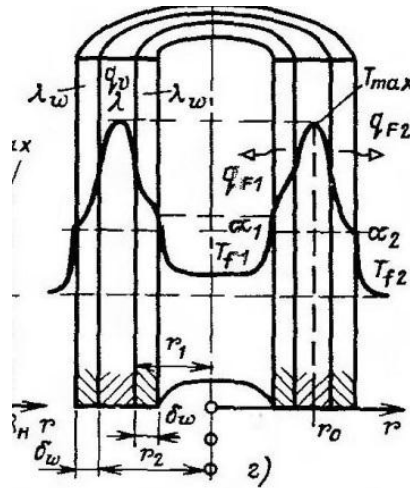


Рис. 1. Распределение температур в кольцевом твэле

Распределение температуры наружной поверхности оболочки твэла по высоте активной зоны

$$t_{об}^H(z) = t_{ти}(z) + \kappa \frac{q_{ли}(z)}{\prod_{ти} \alpha(z) c_{pi}}. \quad (18)$$

По среднему значению температуры наружной поверхности оболочки твэла, равному примерно 500°C, из таблиц теплофизических свойств нержавеющей стали 12X18H10T определяем теплопроводность оболочки твэла $\lambda_{об} = 23,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Температура внутренней поверхности оболочки твэла

$$t_{обв}^{BH}(z) = t_{обв}^H(z) + \kappa \cdot \frac{q_{ли}(z) \delta_{об}}{\prod_{обв} \lambda_{об}} \quad (19)$$

Коэффициент теплоотдачи (проводимость) контактного слоя для внутренней стороны твэла:

$$\delta_{зав}/d_{вн1} = 0,0176,$$

$$\alpha_{зав1} = f(\delta_{зав} / d_{вн1}) = 2,4 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Коэффициент теплоотдачи (проводимость) контактного слоя для наружной стороны твэла:

$$\delta_{зав}/d_{вн2} = 0,0109,$$

$$\alpha_{зав2} = f(\delta_{зав} / d_{вн2}) = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Температура наружной поверхности топливного сердечника

$$t_{сi}^H(z) = t_{обв}^{BH}(z) + \kappa \frac{q_{ли}(z)}{\prod_{зи} \alpha_{завi}}. \quad (20)$$

Для определения температуры внутренней поверхности топливного сердечника в расчетных точках необходимо знать теплопроводность топливного сердечника. Так как теплопроводность диоксида урана обратно пропорциональна температуре топлива, то теплопроводность будем рассчитывать по максимальной температуре, которая устанавливается на нейтральной поверхности, расположенной на радиусе r_0 , так как теплопроводность при этой температуре будет наименьшая.

Теплопроводность топливного сердечника при температуре t_c рассчитывается по зависимости

$$\lambda_c(t_c) = \frac{4 \cdot 10^3}{130 + (t_c + 273)} + 3,4 \cdot 10^{-14} \cdot (t_c + 273)^4. \quad (21)$$

Температура топливного сердечника с наружной стороны

$$t_{c2}(z) = t_{c2}^H(z) + \kappa \frac{q_{12}(z)}{4\pi l \lambda_c(z)} \cdot \left(1 - \frac{2r_0^2(z)}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - r_0^2(z)} \cdot \ln \frac{\frac{d_2}{2}}{r_0(z)} \right). \quad (22)$$

Температура топливного сердечника с внутренней стороны

$$t_{c1}(z) = t_{c1}^H(z) + \kappa \frac{q_{11}(z)}{4\pi l \lambda_c(z)} \cdot \left(\frac{2r_0^2(z)}{\left(-\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + r_0^2(z)\right)} \cdot \ln \frac{r_0(z)}{\frac{d_1}{2}} - 1 \right). \quad (23)$$

Очевидно, что температура топливного сердечника одна, и не важно, с какой стороны мы будем её находить, поэтому можно записать очевидное равенство

$$T_{c1}(z) = T_{c2}(z). \quad (24)$$

Результаты расчёта температурного поля твэлов в расчётных точках по высоте активной зоны даны в табл. 8.

Таблица 8

Результаты расчёта температурного поля твэлов в расчётных точках

z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
$t_{062}^{BH}, ^\circ\text{C}$	390,103	414,434	442,182	471,046	498,911	523,556	543,064	555,907	561,098
$t_{c1}^H, ^\circ\text{C}$	681,828	862,536	1011,82	1118,05	1172,87	1171,98	1115,36	1007,48	856,715
$t_{c2}^H, ^\circ\text{C}$	651,597	815,746	951,976	1049,51	1100,88	1102,02	1052,85	957,220	822,592
$\lambda_c, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	3,657	3,116	2,803	2,642	2,579	2,585	2,661	2,840	3,173
$t_c, ^\circ\text{C}$	700,115	909,328	1086,71	1213,30	1276,15	1270,03	1196,01	1061,67	882,250
$t_{061}^H, ^\circ\text{C}$	381,448	401,545	426,223	453,565	481,389	507,494	529,761	546,492	556,335
$t_{062}^H, ^\circ\text{C}$	379,111	397,563	420,750	446,728	473,605	499,237	521,632	539,036	550,105
$t_{061}^{BH}, ^\circ\text{C}$	401,056	431,639	464,452	496,943	526,530	550,872	567,989	576,585	575,944

Выводы:

1. Оптимально выбранный внутренний диаметр позволяет получить примерно одинаковые расходы, скорости, температуры снаружи и внутри твэла, а также равные площади проходного сечения теплоносителя. Применены проволочные вытеснители на внутренней стороне тепловыделяющего элемента для профилирования расхода.

2. Температурный уровень теплоносителя и твэлов, а также тепловые нагрузки лежат в пределах допустимых величин. Максимальная температура топливного сердечника твэла в наиболее энергонапряженном твэле не превышает 1276°C , следовательно, в реакторе существует запас по температуре топлива. Сравнивая с тем же параметром для стержневого твэла, можно сделать вывод, что топливо в кольцевом твэле работает в более благоприятных условиях, и это значительно улучшает его свойства.

3. Снижение температуры топлива способствует уменьшению температурных градиентов в топливе и увеличению теплопроводности.

4. Выбранный наружный диаметр позволяет повысить прочностные характеристики кольцевых твэлов.

Библиографический список

1. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением / А.В. Жуков [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.
2. **Фарафонов, В.А.** Теплогидравлические и прочностные расчеты реакторов БН / В.А. Фарафонов; Нижегородский гос. тех. ун-т им. П.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 1998. – 40 с.

3. **Дмитриев, С.М.** Применение кольцевых тепловыделяющих элементов в реакторах ВВЭР со сверхкритическими параметрами / С.М. Дмитриев, А.В. Комаров, В.А. Фарафонов // Труды Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 129.
4. **Фарафонов, В.А.**, Расчет тепловой мощности кольцевых твэлов для реакторов ВВЭР. Сравнение тепловой мощности активной зоны при использовании кольцевых и стержневых топливных элементов / В.А. Фарафонов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3 (110). С. 144.
5. **Кириллов, П.Л.** Справочник по теплогидравлическим расчётам / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
6. **Усынин, Г.Б.** Реакторы на быстрых нейтронах: учеб. пособие для вузов / Г.Б. Усынин, Е.В. Кусманцев; под ред. Ф.М. Митенкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2016*

A. V. Komarov, V. A. Farafonov

THE CHOICE OF THE OPTIMAL SIZE OF THE INNER DIAMETER OF THE ANNULAR FUEL ELEMENT FOR REACTORS WITH SODIUM COOLANT

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

Purpose: The main purpose of the thermal-hydraulic calculation of reactors with sodium coolant is to set the heat flux and temperature on the reactor core, to find the maximum fuel temperature in order to confirm the impossibility of melting in the fuel elements with high thermal load.

Design/methodology/approach: All the thermal-hydraulic parameters - heat flow, temperature, coolant parameters, hydraulic resistance - are determined for the maximally loaded fuel element (cell). The calculation is carried out for 9 points on the core height coordinates $z = -0,5; -0,37; -0,25; -0,12; 0,00; 0,12; 0,25; 0,37; 0,5$ m. Calculation results are summarized in the table.

Findings: Optimally selected internal diameter allows to get roughly the same coolant flow, speed, temperature inside and outside of the fuel rod, and equal coolant flow areas. The resulting temperature field of fuel rods suggests that thermal loads are within acceptable limits.

Research limitations/implications: The calculation results show that the annular fuel rods with the selected parameters can be used in reactors with sodium coolant.

Originality/value: The originality of this article is in the identification of the benefits of the annular fuel rods in sodium coolant reactors. Also, the working conditions of these fuel rods are determined for the given parameters.

Key words: temperature, fuel, coolant, shell core.