

- 2013 год - на международном конкурсе «Национальная безопасность», прошедшем в Москве, ФГУП «ГХК» получило диплом и медаль;
- 2013 год - на XVI Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед - 2013» ФГУП «ГХК» получило золотую медаль;
- 2013 год - в Женеве на 41-й международной выставке изобретений «INVENTIONS GENEVA» в категории энергетика ФГУП «ГХК» получило золотую медаль.

Список литературы:

1. Актуализированными концепция вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов по варианту радиационно-безопасного захоронения на месте № 106000/0000130008-АД.
2. Актуализированными концепция вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов по варианту радиационно-безопасного захоронения на месте № 106000/0000130008-АДЭ-1.
3. Актуализированными концепция вывода из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов по варианту радиационно-безопасного захоронения на месте № 106000/0000130008-АДЭ-2.
4. Санитарные правила обеспечения радиационной безопасности при выводе из эксплуатации промышленных реакторов, СП ВЭ ПР-2001.
5. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения. НП-058-04.

Оценка возможных погрешностей при определении эффективной температуры топлива

Кан А.Ю., Кузьмин А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В работе [1] предложена методика расчета эффективной температуры топлива, необходимой для оценки мощностного эффекта и мощностного коэффициента реактивности – важнейших показателей надёжности и безопасности эксплуатации ядерного реактора. Для определения этой характеристики в соответствии с современными методиками теплового расчета ядерного реактора возникает необходимость определения гидравлического диаметра бесконечной решетки тепловыделяющих стержней. Рекомендуемые расчетные формулы для гидравлического диаметра [2] ориентированы на единственный элементарный тип эквивалентной ячейки, что не всегда согласуется с требованиями нейтронно-физического расчета. Другая проблема связана с оценкой эффективности параболической аппроксимации точного решения для температуры топливного сердечника в виде модифицированной функции Бесселя.

Целью данной работы является оценка возможных погрешностей, связанных с разными трактовками эквивалентных ячеек и с использованием параболической аппроксимации в определении эффективной температуры топлива.

Рассмотрим смысл гидравлического диаметра бесконечной решетки стержней. В справочнике [2] предложены следующие формулы:

для бесконечной квадратной решётки

$$d_{\bar{a}} = d_{\circ} \cdot \left(\frac{4x^2}{\pi} - 1 \right) = d_{\circ} \cdot \left(\frac{\dot{a}^2}{\pi d_{\circ}^2 / 4} - 1 \right) = d_{\circ} \cdot \left(\frac{V_{\dot{y}\dot{y}}}{V_{\dot{\circ} \dot{a}\dot{y}\dot{e}}} - 1 \right);$$

для бесконечной треугольной или гексагональной решётки

$$d_{\bar{a}} = d_{\circ} \cdot \left(\frac{2\sqrt{3}x^2}{\pi} - 1 \right) = d_{\circ} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}/2 \cdot \dot{a}^2}{\pi d_{\circ}^2 / 4} - 1 \right) = d_{\circ} \cdot \left(\frac{V_{\dot{y}\dot{y}}}{V_{\dot{\circ} \dot{a}\dot{y}\dot{e}}} - 1 \right),$$

где $V_{\dot{y}\dot{y}}$ – объём элементарной макроячейки, $V_{\dot{\circ} \dot{a}\dot{y}\dot{e}}$ – объём твэла на 1 см высоты активной зоны.

Таким образом, расчетная формула для гидравлического диаметра примет вид

$$d_{\bar{a}} = d_{\circ} \cdot \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\dot{\circ} \dot{a}\dot{y}\dot{e}}},$$

в которой $V_{\text{H}_2\text{O}}$ – объём воды в элементарной микроячейке.

Данная формула в принципе вытекает из водоуранового отношения для элементарной эквивалентной ячейки: на один твэл приходится объём воды, определяемый заданным размером твэла и шагом решетки.

В нашем случае водоурановое отношение определяется для эквивалентной макроячейки, включающей всю ТВС с водяным межкассетным зазором.

На величину максимальной температуры стенки твэла t_{cm}^{max} влияет выбор определения определяющего размера, обычно гидравлический диаметр d_c . При определении d_c с учетом и без учета водяного зазора между кассетами погрешность в определении t_{cm}^{max} составляет меньше 0,5%, которой можно пренебречь.

При распределении тепловыделения по радиусу цилиндрического твэла в виде модифицированной функции Бесселя при постоянной теплопроводности ($\lambda_m = const$) температура в сердечнике определяется формулой [2]

$$t_m(r) = t_{cep} + \frac{q_l}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_m} \cdot \frac{I_0(\chi \cdot r_m) - I_0(\chi \cdot r)}{\chi \cdot r_m \cdot I_1(\chi \cdot r_m)}. \quad (1)$$

Приближенно данное выражение можно записать в виде [1]:

$$t_m(r) = t_{cep} + \frac{q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_m} \cdot \frac{1 - \left(\frac{r}{r_m}\right)^2 + \frac{\chi^2 \cdot r_m^2}{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{r_m}\right)^4\right]}{1 + \frac{\chi^2 \cdot r_m^2}{8}}, \quad (2)$$

где t_{cep} - температура поверхности топливного сердечника [3], °C; q_l - средний линейный тепловой поток [3], кВт/м; r_m - диаметр топливного сердечника [3], мм; $\chi = 1/L_0$ - материальный параметр, см⁻¹; L_0 - длина диффузии, см.

L_0 принимается равным среднему значению, соответствующее горячему состоянию реактора [4], т.е. $Q_p = 3000 \text{ МВт}$; $\tilde{N}_{\hat{\lambda}} = 8,01 \text{ г/г}$; все ОР СУЗ на ВКВ.

При известных величинах выражения (1) и (2) соответственно примут вид:

$$t_m(r) = 536 + \frac{15,9}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,07} \cdot \frac{I_0(0,2489 \cdot 4,55) - I_0(0,2489 \cdot r)}{0,2489 \cdot 4,55 \cdot I_1(0,2489 \cdot 4,55)} \approx$$

$$\approx 536 + \frac{15,9}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,07} \cdot \frac{1 - \left(\frac{r}{4,55}\right)^2 + \frac{0,2489^2 \cdot 4,55^2}{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{4,55}\right)^4\right]}{1 + \frac{0,2489^2 \cdot 4,55^2}{8}}.$$

При постоянной теплопроводности распределение температуры также можно представить как параболическое:

$$t_m(r) = t_{cep} + \frac{q_v}{4 \cdot \lambda_m} \cdot (r_m^2 - r^2), \quad (3)$$

где q_v - объемное тепловыделение в сердечнике:

$$q_v = \frac{q_l}{\pi \cdot r_\delta^2} = \frac{15,9 \cdot 10^3}{3,14 \cdot (4,55 \cdot 10^{-3})^2} = 244,5 \text{ МВт/м}^3.$$

Тогда

$$t_m(r) = 536 + \frac{244,5}{4 \cdot 4,07} \cdot (4,55^2 - r^2).$$

Для наглядности построим (1), (2) и (3) на одном графике.

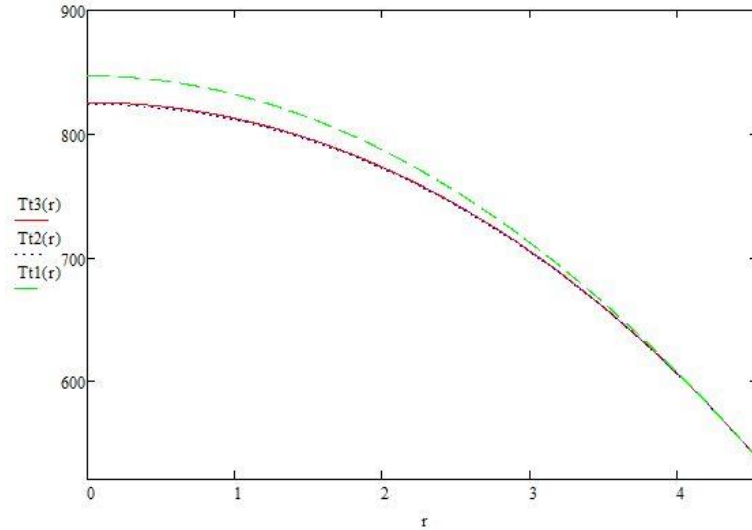


Рис. 1. Распределение температуры в сердечнике ТВЭЛА

Пунктирной линией показано параболическое распределение температуры в сердечнике твэла (выражение (3)), сплошной — при приближенном бесселевском (выражение (2)), точечной — при точном бесселевском (выражение (1)).

Эффективная температура топлива определяется по формуле:

$$t_{эф} = t_{cm}^{max} + 0,4 \cdot (t_m^{max} - t_{cm}^{max}),$$

где t_{cm}^{max} — максимальная температура стенки твэла, °С;

t_m^{max} — максимальная температура сердечника твэла (при $r = 0$), °С.

Процесс определения эффективной температуры топлива итерационный. В первом приближении при $\lambda_{\delta} = 4,07$ Вт/(м·К) [5] для всех трех случаев t_m^{max} будет соответственно равна:

$$t_{\delta 1}^{max}(0) = 536 + \frac{15,9}{2 \cdot 3,14 \cdot 4,07} \cdot \frac{I_0(0,2489 \cdot 4,55) - I_0(0,2489 \cdot 0)}{0,2489 \cdot 4,55 \cdot I_1(0,2489 \cdot 4,55)} = 824 \text{ °С};$$

$$t_{\delta 2}^{max}(0) = 536 + \frac{15,9}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,07} \cdot \frac{1 - \left(\frac{0}{4,55}\right)^2 + \frac{0,2489^2 \cdot 4,55^2}{16} \cdot \left[1 - \left(\frac{0}{4,55}\right)^4\right]}{1 + \frac{0,2489^2 \cdot 4,55^2}{8}} = 825,4 \text{ °С};$$

$$t_{\delta 3}^{max}(0) = 536 + \frac{244,5}{4 \cdot 4,07} \cdot (4,55^2 - 0^2) = 846,9 \text{ °С}.$$

Погрешность определения t_m^{max} между точным и приближенным бесселевским распределением равна:

$$\Delta_{12} = \left| \frac{t_{m1}^{max}(0) - t_{m2}^{max}(0)}{t_{m1}^{max}(0)} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{824 - 825,4}{824} \right| \cdot 100\% = 0,17\%.$$

Погрешность определения t_m^{max} между точным бесселевским и параболическим распределением равна:

$$\Delta_{13} = \left| \frac{t_{m1}^{max}(0) - t_{m3}^{max}(0)}{t_{m1}^{max}(0)} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{824 - 846,9}{824} \right| \cdot 100\% = 2,8\%.$$

Далее определим значение эффективной температуры для каждого случая:

$$t_{\delta 1}^1 = 301,5 + 0,4 \cdot (824 - 301,5) = 510,5 \text{ °С}; \quad t_{\delta 2}^1 = 301,5 + 0,4 \cdot (825,4 - 301,5) = 511,1 \text{ °С};$$

$$t_{\delta 3}^1 = 301,5 + 0,4 \cdot (846,9 - 301,5) = 519,7 \text{ °С}.$$

Погрешности определения эффективной температуры составляют:

$$\Delta_{12}^{\text{эф}} = \left| \frac{t_{\text{эф}1} - t_{\text{эф}2}}{t_{\text{эф}1}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{510,5 - 511,1}{510,5} \right| \cdot 100\% = 0,11\%;$$

$$\Delta_{13}^{\text{эф}} = \left| \frac{t_{\text{эф}1} - t_{\text{эф}3}}{t_{\text{эф}1}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{510,5 - 519,7}{510,5} \right| \cdot 100\% = 1,8\%.$$

Примем $t_{\text{y}\delta 1} = \bar{t}_{\text{н}\delta\delta 1} = 510,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Этому значению температуры соответствует $\lambda_{\delta 1} = 4,24$ Вт/(м·К). Соответственно $t_{\text{y}\delta 2} = \bar{t}_{\text{н}\delta\delta 2} = 511,1 \text{ } ^\circ\text{C}$; $\lambda_{\delta 2} = 4,23$ Вт/(м·К);

$$t_{\text{y}\delta 3} = \bar{t}_{\text{н}\delta\delta 3} = 519,7 \text{ } ^\circ\text{C}; \lambda_{\delta 3} = 4,20 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Повторим расчет. Промежуточные значения занесем в Таблицу 1.

Таблица 1. Таблица промежуточных значений

Параметры	Номер итерации		
	1	2	3
$\bar{t}_{\text{н}\delta\delta 1}, \text{ } ^\circ\text{C}$	536	510,5	505,9
$\bar{t}_{\text{н}\delta\delta 2}, \text{ } ^\circ\text{C}$	536	511,1	506,7
$\bar{t}_{\text{н}\delta\delta 3}, \text{ } ^\circ\text{C}$	536	519,7	515,8
$\lambda_{\delta 1}, \text{ Вт/(м·К)}$	4,07	4,29	4,32
$\lambda_{\delta 2}, \text{ Вт/(м·К)}$	4,07	4,28	4,31
$\lambda_{\delta 3}, \text{ Вт/(м·К)}$	4,07	4,20	4,27
$t_{\delta 1}^{\text{max}}(0), \text{ } ^\circ\text{C}$	824	812,5	807,3
$t_{\delta 2}^{\text{max}}(0), \text{ } ^\circ\text{C}$	825,4	814,5	809,3
$t_{\delta 3}^{\text{max}}(0), \text{ } ^\circ\text{C}$	846,9	837,3	832,3
$\Delta_{12}, \text{ } \%$	0,17	0,25	0,24
$\Delta_{13}, \text{ } \%$	2,80	3,1	3,1
$t_{\text{y}\delta 1}, \text{ } ^\circ\text{C}$	510,5	505,9	503,8
$t_{\text{y}\delta 2}, \text{ } ^\circ\text{C}$	511,1	506,7	504,6
$t_{\text{y}\delta 3}, \text{ } ^\circ\text{C}$	519,7	515,8	513,8
$\Delta_{12}^{\text{эф}}, \text{ } \%$	0,11	0,16	0,16
$\Delta_{13}^{\text{эф}}, \text{ } \%$	1,80	2,0	1,96
$\Delta_1^{\text{ум}}, \text{ } \%$	-	0,90	0,40
$\Delta_2^{\text{ум}}, \text{ } \%$	-	0,86	0,41
$\Delta_3^{\text{ум}}, \text{ } \%$	-	0,74	0,38

Относительная погрешность в определении эффективной температуры между тепловыделениями в виде функций Бесселя, точной и приближенной, составляет 0,16%, что говорит о практической возможности использования обоих способов решения. Однако, если сравнивать параболическое и точное бесселевское тепловыделения, то выбор варианта расчета эффективной температуры будет зависеть от постановки исходной задачи, так как относительная погрешность составляет 1,96%.

Таким образом, проведенная оценка погрешностей, связанных с разной трактовкой определения гидравлического диаметра и с применением параболических аппроксимаций в расчете эффективной температуры, не вносят существенных погрешностей.

Список литературы:

1. Кан А.Ю., Кузьмин А.В. Определение эффективной температуры топлива реактора на тепловых нейтронах. Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции /Томский политехнический университет, 4-6 декабря 2013 – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013. Т. II. – 434 с (с.146-148).
2. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам: (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Под общ. ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296с.
3. Афров А.М. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. - М.:Логос, 2006. 488с.
4. Синяткин Е.Ю. Выпускная квалификационная работа «Определение характеристик топливной загрузки ВВЭР-1000 на текущую микрокампанию различными методами». г. Томск, 2014. 127с.
5. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Учебное справочное пособие для студентов специальностей: 14.03.05 – Ядерные реакторы и энергетические установки, 14.04.04 – Атомные электрические станции и установки / Под общ. ред. проф. П.Л. Кириллова; 2-е изд. перераб. и доп. – М.: ИздАт, 2007. – 200 с.

Корректировка групповых ядерно-физических констант ^{238}U по возрасту нейтронов деления до индиевого резонанса

Кузьмин А.В., Южаков А.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Приводится алгоритм расчета возраста замедляющихся нейтронов в среде ^{238}U , имеющего наибольшее поглощение в резонансной области при замедлении нейтронов деления до энергии индиевого резонанса. Расчёт проводился без учёта деления ^{238}U и сравнивался с имеющимися оценками.

Возраст связан с миграцией быстрых нейтронов в процессе замедления. Эта характеристика важна при расчете размеров активной зоны ядерного реактора, так как она определяет утечку замедляющихся нейтронов. По согласованию теоретического и экспериментального определения возраста можно судить о правильности выбора ядерно-физических констант. Ядерно-физические константы в основном предназначены для инженеров-физиков при проектировании и эксплуатации ядерных реакторов и нейтронной защиты. Эти характеристики постоянно обновляются с получением новых экспериментальных и теоретических результатов и обобщаются в соответствующих справочниках и библиотеках баз данных.

В работах по расчету возраста в графите [1] и в натрии [2] использовались групповые константы [3], позволившие получить результаты, хорошо согласующие либо с прямыми измерениями, либо с расчетами по ранее установленным групповым константам [4]. Особенностью замедления нейтронов в среде натрия явилось резонансное упругое рассеяние, представленное в 28-групповой системе констант единственным резонансом. Особенностью замедления нейтронов в среде ^{238}U является резонансное поглощение (рис. 1). Целью настоящей работы является оценка различных версий многогруппового описания замедления нейтронов в среде ^{238}U – наиболее сильного резонансного поглотителя активной зоны ядерного реактора на тепловых нейтронах.

Область определения возраста принята от средней энергии спектра нейтронов деления ^{235}U равного $E_0 = 2 \text{ МэВ}$ до энергии индиевого резонанса $E_{\text{ин}} = 1,46 \text{ эВ}$, то есть в диапазоне замедления нейтронов в тепловом реакторе.

Основные энергетические характеристики групп [3] представлены в табл.1, где \bar{i} – означает среднее значение летаргии в группе.