

Методика параметрического описания входных данных для расчета радиационного распухания ВКУ ВВЭР-1000

Разработана методика параметрического описания полей объемных тепловыделений при γ -разогреве и скорости набора радиационной дозы в выгородке ядерного реактора ВВЭР-1000 для упрощенных расчетных оценок стационарной температуры, радиационного распухания и напряженно-деформированного состояния конструкции. Методика основана на аппроксимации полей входных данных полиномами n -й степени по радиальной и окружной координатам. Погрешность результатов расчетов по данной методике не превышает 33 %, что позволяет применять методику для первичных оценок технического состояния внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-1000.

Ключевые слова: внутрикорпусные устройства (ВКУ), ВВЭР-1000, γ -разогрев, радиационная доза, методика, моделирование, поле температуры, распухание.

І. В. Мірзов, С. М. Кандаля

Методика параметричного опису вхідних даних для розрахунку радіаційного розпухання внутрішньокорпусних пристроїв ВВЕР-1000

Розроблено методику параметричного опису полів об'ємних тепловиділень під час γ -розігріву та швидкості набору радіаційної дози у вигородці ядерного реактора ВВЕР-1000 для спрощених розрахункових оцінок стаціонарної температури, радіаційного розпухання й напружено-деформованого стану конструкції. Методика заснована на апроксимації полів вхідних даних поліномами n -го ступеня за радіальною та коловою координатами. Похибка результатів розрахунків за даною методикою не перевищує 33 %, що дозволяє застосовувати методику для первинних оцінок технічного стану внутрішньокорпусних пристроїв реакторів ВВЕР-1000.

Ключові слова: внутрішньокорпусні пристрої, ВВЕР-1000, γ -розігрів, радіаційна доза, методика, моделювання, поле температури, розпухання.

© И. В. Мирзов, С. М. Кандаля, 2016

Рассчитывая напряженно-деформированное состояние (НДС) внутрикорпусных устройств (ВКУ) ВВЭР-1000, в качестве входных параметров (входных данных) используют поля объемных тепловыделений вследствие γ -разогрева и скорость набора радиационной дозы. Эти величины зависят от топливной загрузки активной зоны реактора и должны рассчитываться отдельно для каждого энергоблока АЭС.

Численное определение полей объемных тепловыделений вследствие γ -разогрева и скорости набора радиационной дозы крайне актуально при оценке технического состояния ВКУ украинских энергоблоков. При этом передача массивов входных данных в прочностной расчет ВКУ представляет определенную трудность, потому что тепловые, нейтронно-физические и прочностные расчеты выполняются различными организациями в различных конечно-элементных моделях. В этом плане было бы намного удобнее представлять поля объемных тепловыделений и радиационной дозы в ВКУ параметрически.

На данный момент полноценные тепловые и нейтронно-физические расчеты для ВКУ украинских энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 может выполнить только чешская компания UJV Rez, в отчете [1] которой представлены поля объемных тепловыделений (H) вследствие γ -разогрева и скорость набора радиационной дозы (D) для ВКУ, определенные для 22-й кампании энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС (рис. 1).

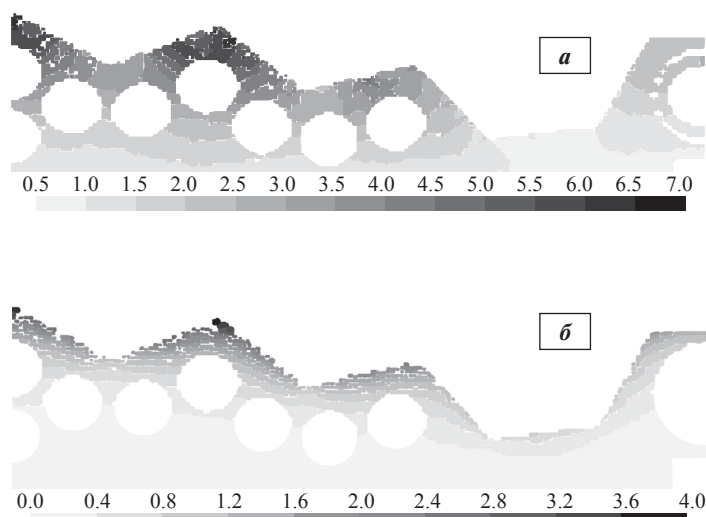


Рис. 1. Входные данные UJV Rez для 22-й кампании энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС:

a — объемные тепловыделения, Вт/см³; *b* — повреждающая доза за кампанию, сна (смещения на атом)

Подобные расчеты в Институте ядерных исследований НАН Украины при продлении ресурса ВКУ энергоблоков № 2 Южно-Украинской АЭС и №№ 1, 2 Запорожской АЭС проведены весьма упрощенно [2, 3, 4]: вычислены флюенс нейтронного потока и повреждающая доза за определенный период эксплуатации лишь в отдельных точках ВКУ (рис. 2), а расчеты объемных тепловыделений вследствие γ -разогрева этих энергоблоков вовсе не выполнялись.

Цель данной работы — создать методику параметрического описания входных данных по объемным тепловыделениям и скорости набора дозы в максимальном сечении ВКУ в двумерном случае, которая будет применима ко

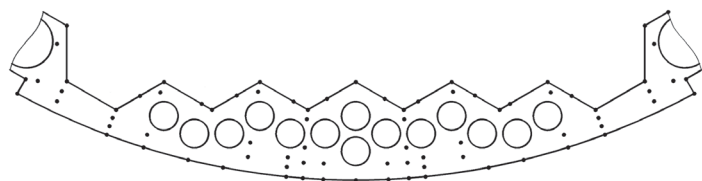


Рис. 2. Система расчетных точек выгорядки энергоблоков № 2 Южно-Украинской АЭС и №№ 1, 2 Запорожской АЭС, применяемая в Институте ядерных исследований НАН Украины

всем энергоблокам ВВЭР-1000 и сильно упростит задачу расчета температурных полей и радиационного распухания ВКУ.

Метод исследования. Положим, что входные параметры H и D циклически симметричны с периодом 60° , и каждый 60 -градусный сектор имеет зеркальную симметрию относительно сечения выгорядки малыми каналами.

Основная идея — разложить поля объемных тепловыделений $H(R, \theta)$ и радиационной дозы $D(R, \theta)$ в максимальном

сечении ВКУ на множители, которые отдельно количественно и качественно охарактеризуют эти поля в течение отдельной топливной кампании или всего срока эксплуатации. Для этого в двумерном случае предлагается разложить функции $H(R, \theta)$ и $D(R, \theta)$ в виде

$$\begin{aligned} H(R, \theta) &= C_H \cdot H(R) \cdot H(\theta), \\ D(R, \theta) &= C_D \cdot D(R) \cdot D(\theta), \end{aligned} \quad (1)$$

где R — координата в радиальном направлении; θ — координата в окружном направлении; функции $H(R)$, $H(\theta)$ и $D(R)$, $D(\theta)$ нормированы к единице и описывают качественное распределение тепловыделений и радиационной дозы в плане; C_H , C_D — количественные множители (амплитуда).

В работе проанализированы данные по H для энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС (только 22-я кампания) [1] и по D для энергоблоков № 2 Южно-Украинской АЭС [2] и №№ 1 и 2 Запорожской АЭС (усредненные за 25 лет значения) [3, 4]. Параметры C_H и C_D определены

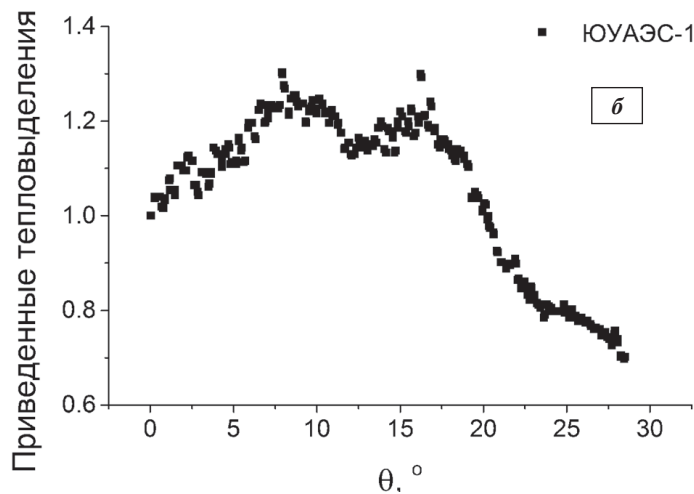
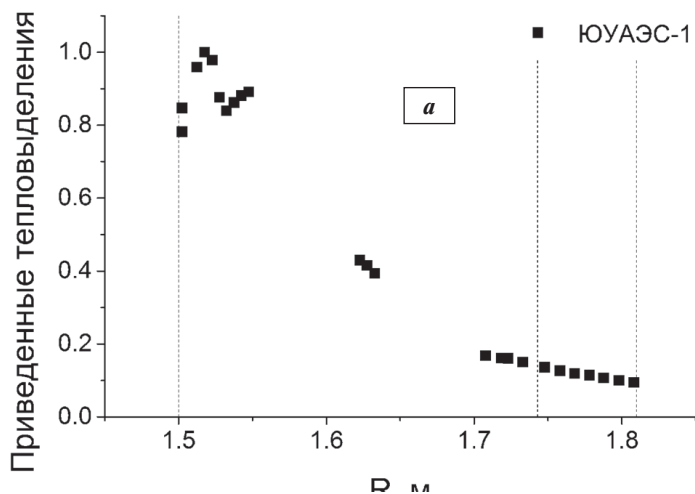


Рис. 3. Нормированные к единице данные по γ -разогреву выгорядки [1]: а — распределение по радиусу; б — распределение по окружности

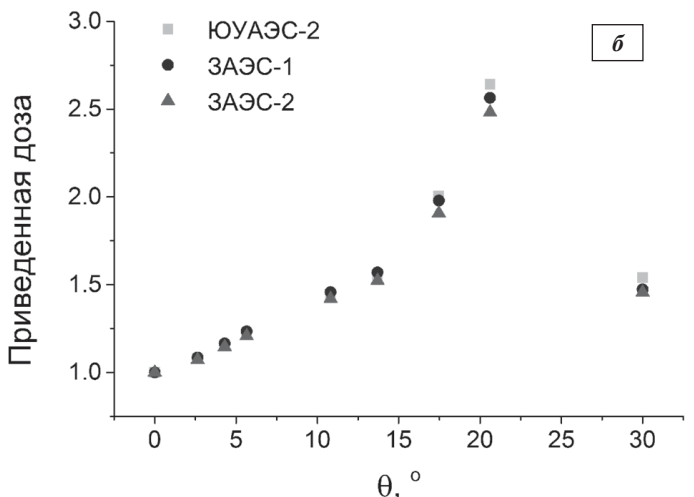
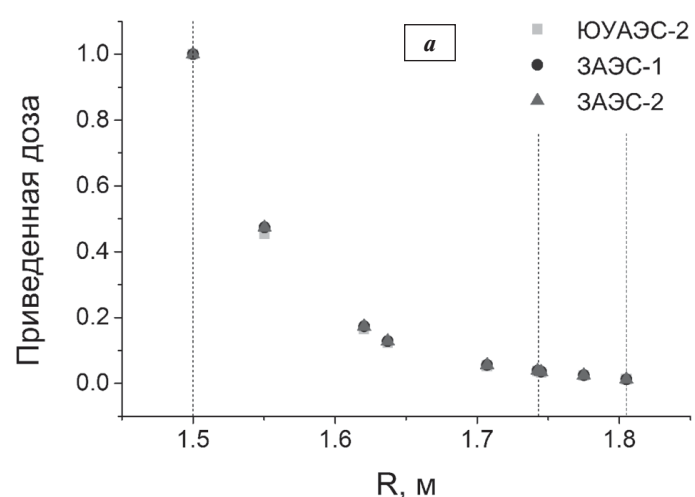


Рис. 4. Нормированные к единице данные по радиационной дозе [2–4]: а — распределение по радиусу; б — распределение по окружности

Таблица 1. Значения коэффициентов аппроксимационных полиномов

<i>n</i>	Коеф-фициент аппроксимационных полиномов	<i>H(R)</i>	<i>H(θ)</i>	<i>D(R)</i>	<i>D(θ)</i>
0	<i>a</i> ₀	—	1	—	1
1	<i>a</i> ₀	5,42	1	5,92	1
	<i>a</i> ₁	-2,94	-1,04e-02	-3,28	1,56e-02
2	<i>a</i> ₀	26,36	1	35,02	1
	<i>a</i> ₁	-28,42	3,87e-02	-38,81	7,08e-02
	<i>a</i> ₂	7,68	-1,84e-03	10,75	-1,84e-03
3	<i>a</i> ₀	-145,81	1	413,80	1
	<i>a</i> ₁	287,72	4,90e-02	-719,22	-3,15e-02
	<i>a</i> ₂	-185,31	-3,04e-03	416,78	1,08e-02
	<i>a</i> ₃	39,17	3,15e-05	-80,51	-3,04e-04
4	<i>a</i> ₀	-3313,85	1	2410,41	1
	<i>a</i> ₁	8014,05	2,67e-02	-5566,05	9,75e-02
	<i>a</i> ₂	-7240,28	1,65e-03	4822,15	-1,85e-02
	<i>a</i> ₃	2897,68	-2,56e-04	-1857,39	1,52e-03
	<i>a</i> ₄	-433,63	5,37e-06	268,35	-3,32e-05

по радиальным распределениям входных данных в сечении малыми каналами выгородки (θ=0) энергоблока № 1 Южно-Украинской АЭС:

$$C_H = 6,727 \text{ Вт/см}^3, \quad C_D = 1,336 \text{ сна/год.}$$

Для функций *H(R)*, *H(θ)* и *D(R)*, *D(θ)* выполнена нормировка к единице данных по всем имеющимся энергоблокам. На рис. 3 и 4 представлены распределения по радиусу и по окружности приведенных к единице данных по γ-разогреву и радиационной дозе в выгородке. Графики *H(R)* и *D(R)* построены в сечении выгородки малыми каналами, и именно от этого сечения отсчитывается угол θ. Функции *H(R)* и *D(R)* нормированы к единице по радиусу ВКУ, функции *H(θ)* и *D(θ)* нормированы к единице по левому краю, где θ=0, т. е. в сечении выгородки малыми каналами.

Нормированные к единице функции *H* и *D* аппроксимированы полиномами *n*-го порядка с последовательным увеличением *n* на единицу. Аппроксимационные полиномы по *R* и *θ* выглядят таким образом:

$$F(R) = \sum_{i=0}^{n_R} a_i R^i, \quad F(\theta) = \sum_{j=0}^{n_\theta} a_j \theta^j,$$

где *n_R* и *n_θ* — порядок полиномов по *R* и *θ*.

В работе рассмотрены случаи 1 ≤ *n_R* ≤ 4, 0 ≤ *n_θ* ≤ 4. Значения коэффициентов *a_i* и *a_j* аппроксимационных полиномов для всех случаев приведены в табл. 1.

Поля температуры *T* и радиационного распухания ε^{sw} в выгородке рассчитаны по описанной в [1] методике.

Для расчета теплового потока $q \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ применены гранич-

ные условия третьего рода, расчет распухания ε^{sw} проведен без учета напряженного состояния и радиационной ползучести:

$$q = -h(\theta_{in} - \theta_{out}),$$

$$\epsilon^{sw} = 0,55 \cdot (D + 0,1 \cdot T - 67) \cdot \exp[-2,9 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 485)^2] \%,$$

где *h* — коэффициент теплопередачи, $[h] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; θ_{in} — температура материала выгородки; θ_{out} — температура теплоносителя.

Результаты расчета поля температуры в выгородке по разработанной методике сравнены с результатами [1] в нескольких характерных точках (A–F, рис. 5). Результаты расчета распухания выгородки после 60 лет эксплуатации сравнены с данными [1] в точках A–B (рис. 6). Значения температуры и распухания из [1] в выбранных точках приведены в табл. 2.

Методические погрешности δ^{max} определения температуры и распухания выгородки находились по формулам

$$\delta_T^{\max} = \max \left(\left| \frac{T - T_i}{T} \right| \right) \cdot 100 \%, \quad \delta_\epsilon^{\max} = \max \left(\left| \frac{\epsilon^{sw} - \epsilon_i^{sw}}{\epsilon^{sw}} \right| \right) \cdot 100 \%,$$

где *T*, ε^{sw} — температура и распухание из [1]; *T_i*, ε^{sw_i} — результаты расчета по разработанной методике; *i* пробегает значения по всем характерным точкам.

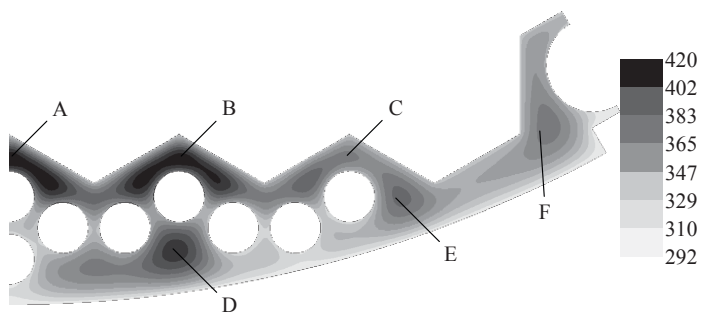


Рис. 5. Поле температуры в выгородке из [1], °С

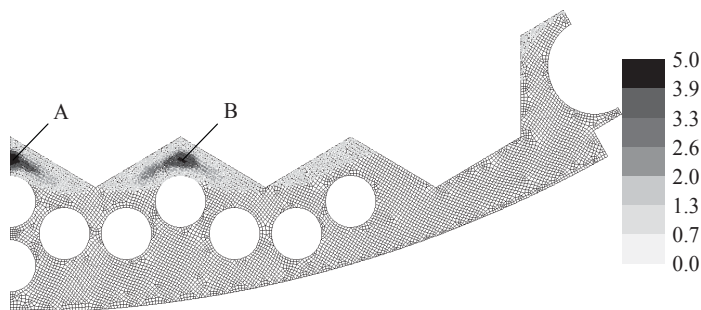


Рис. 6. Поле объемных деформаций распухания в выгородке после 60 лет эксплуатации из [1], %

Таблица 2. Результаты расчета полей температуры и распухания в выгородке для всех аппроксимационных полиномов

n_R	n_θ	$T_A, ^\circ\text{C}$	$T_B, ^\circ\text{C}$	$T_C, ^\circ\text{C}$	$T_D, ^\circ\text{C}$	$T_E, ^\circ\text{C}$	$T_F, ^\circ\text{C}$	$\delta_T^{\max}, \%$	$\epsilon_A^{sw}, \%$	$\epsilon_B^{sw}, \%$	$\delta_e^{\max}, \%$
[1]		420	420	373	408	385	373		4,6	4,2	
1	0	424	418	387	495	452	494	32,3	9,3	10,5	151,0
2		414	404	369	416	394	424	13,5	7,6	7,7	82,7
3		420	410	372	407	387	418	12,1	5,5	4,2	19,1
4		423	413	371	401	383	411	10,1	4,9	3,5	16,9
1	1	424	408	373	479	424	442	18,5	9,3	12,7	202,4
2		414	396	359	406	376	391	5,8	7,6	9,5	126,6
3		419	402	362	398	371	387	4,4	5,5	5,5	32,0
4		423	404	360	393	368	382	4,5	4,9	4,7	12,7
1	2	427	438	396	531	463	442	30,2	9,3	18,3	334,7
2		417	422	376	439	400	390	7,5	7,7	14,1	235,3
3		423	430	380	428	392	386	4,9	5,5	8,9	112,4
4		426	432	378	421	388	381	3,2	5,0	7,9	87,5
1	3	428	440	394	536	460	445	31,3	9,3	16,1	282,2
2		417	424	375	441	398	393	8,2	7,6	12,2	191,3
3		423	431	379	430	391	389	5,5	5,5	7,6	79,9
4		426	434	377	424	387	383	3,8	4,9	6,6	57,3
1	4	426	440	395	534	459	447	31,0	9,3	14,7	251,0
2		416	424	375	441	398	394	8,0	7,7	11,2	165,7
3		422	432	379	430	390	390	5,3	5,5	6,8	61,1
4		425	435	377	423	387	384	3,6	5,0	5,9	39,5

Полученные результаты. Результаты расчета полей температуры и распухания в выгородке для всех аппроксимационных полиномов из табл. 1 приведены в табл. 2. Максимальную точность при расчете температуры выгородки дают полиномы 4-го порядка по R и 2-го порядка по θ . Максимальную точность при расчете распухания

выгородки за 60 лет дают полиномы 4-го порядка по R и 1-го порядка по θ .

Поля температуры и распухания выгородки по разработанной методике с применением полиномов, обеспечивающих максимальное сходство результатов с [1], показаны на рис. 7 и 8.

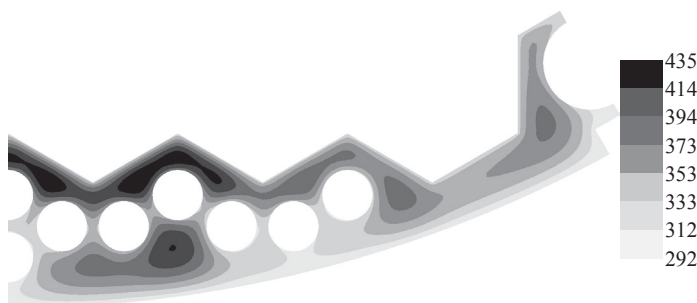


Рис. 7. Результат расчета поля температуры в выгородке при параметрическом описании входных данных, $^\circ\text{C}$ (табл. 2, $n_R=4$, $n_\theta=2$)

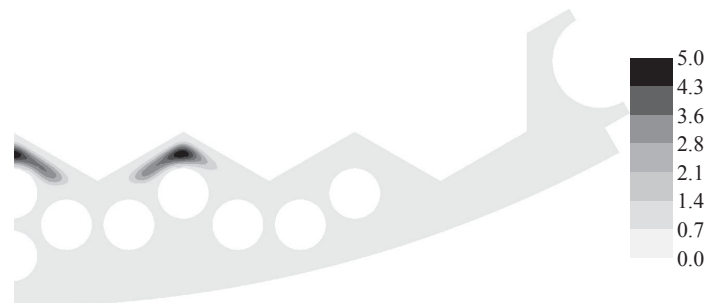


Рис. 8. Результат расчета распухания выгородки при параметрическом описании входных данных, $\%$ (табл. 2, $n_R=4$, $n_\theta=1$)

При распухании выгородка деформируется в радиальном направлении. В холодном состоянии после 60 лет эксплуатации максимальные перемещения внутренней поверхности выгородки внутрь активной зоны в соответствии с [1] составляют 1,6 мм; максимальные перемещения внешней поверхности наружу — 1,2 мм. В то же время расчет радиальных перемещений выгородки по разработанной методике с применением параметрического описания входных данных дает соответственно 2,1 мм и 1,6 мм для радиальных перемещений выгородки внутрь и наружу активной зоны в холодном состоянии после 60 лет эксплуатации.

Обсуждение результатов. Рис. 7 и 8 показывают хорошее качественное соответствие получаемых полей температуры и распухания с результатами [1]. Что касается количественного соответствия, по результатам табл. 2 поле температуры в выгородке определено с относительной погрешностью 3,2 %, относительная погрешность определения распухания — 12,7 %. Относительная погрешность расчета радиальных перемещений по сравнению с результатами [1] составляет приблизительно 33 %.

Разработанная методика дает завышенные значения температуры и распухания в точках А—В и, как следствие, более консервативные значения радиальных перемещений выгородки. Это оправдывает применение разработанной методики для первичных оценок технического состояния внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-1000.

Выводы

Разработана методика параметрического описания полей объемных тепловыделений $H(R, \theta)$ при γ -разогреве и скорости набора радиационной дозы $D(R, \theta)$ в выгородке ядерного реактора ВВЭР-1000. В двумерном случае предлагается разложить функции $H(R, \theta)$ и $D(R, \theta)$ на множители

$$H(R, \theta) = C_H \cdot H(R) \cdot H(\theta), \quad D(R, \theta) = C_D \cdot D(R) \cdot D(\theta),$$

$$\begin{aligned} \text{где } H(R) &= -3313,85 + 8014,05 \cdot R - 7240,28 \cdot R^2 + 2897,68 \cdot R^3 - 433,63 \cdot R^4, \\ H(\theta) &= 1 + 3,87 \cdot 10^{-2} \cdot \theta - 1,84 \cdot 10^{-3} \cdot \theta^2, \\ D(R) &= 2410,41 - 5566,05 \cdot R + 4822,15 \cdot R^2 - \\ &\quad - 1857,39 \cdot R^3 + 268,35 \cdot R^4, \\ D(\theta) &= 1 + 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot \theta. \end{aligned}$$

Амплитуды $C_H = 6,727$ Вт/см³, $C_D = 1,336$ сна/год соответствуют энергоблоку № 1 Южно-Украинской АЭС.

Относительные погрешности методики составляют:

- 3,2 % при расчете поля температуры,
- 12,7 % при расчете распухания,
- 33,0 % при расчете радиальных перемещений выгородки.

Разработанная методика может применяться для первичных оценок технического состояния внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-1000.

Список использованной литературы

1. Дополнительные работы по оценке технического состояния элементов реактора энергоблока № 1 ОП Южно-Украинской АЭС (этап № 6). Оценка радиационного распухания выгородки : Отчет ИЯИ Ржеж / Пиштора В., Вандлик С., Лауерова Д., Андел И. — 2011. — 141 с.

2. Определение и прогнозирование флюенса нейтронов на внутрикорпусные устройства (выгородка) реактора энергоблока № 2 ОП Южно-Украинская АЭС : Технический отчет по этапу 2 / Буканов В. Н., Васильева Е. Г., Грищенко А. В., Демехин В. Л., Пугач А. М., Пугач С. М., Илькович В. В., Рябец А. В.; Институт ядерных исследований НАН Украины. — 2014. — 293 с.

3. Определение и прогнозирование флюенса нейтронов на внутрикорпусные устройства (выгородка, шахта внутрикорпусная, блок защитных труб) реактора энергоблока № 1 ОП ЗАЭС : Отчет по этапам 1, 3, 5 договора № 75/140–14 / Буканов В. Н., Васильева Е. Г., Грищенко А. В., Демехин В. Л., Пугач А. М., Пугач С. М., Илькович В. В., Рябец А. В.; Институт ядерных исследований НАН Украины. — 2014. — 330 с.

4. Определение и прогнозирование флюенса нейтронов на внутрикорпусные устройства (выгородка, шахта внутрикорпусная, блок защитных труб) реактора энергоблока № 2 ОП ЗАЭС : Отчет по этапам 2, 4, 6 договора № 75/140–14 / Буканов В. Н., Васильева Е. Г., Грищенко А. В., Демехин В. Л., Пугач А. М., Пугач С. М., Илькович В. В., Рябец А. В.; Институт ядерных исследований НАН Украины. — 2014. — 332 с.

References

1. *Pishtora, V., Vandlik, S., Lauerova, D., Andel, I.* (2011), “Additional Efforts of Assessing Technical State of SUNPP-1 Reactor Components. Assessment of Radiation Swelling of Core Baffle. NRI REZ Report.” [Dopolnitelnyie raboty po otsenke tekhnicheskogo sostoiania elementov reaktora energobloka No. 1 OP Yuzhno-Ukrainskoi AES (etap No. 6). Otsenka radiatsionnogo raspukhaniia vygorodki: Otchiot IYaI Rzhzh], 141 p. (Rus)

2. *Bukanov, V.N., Vasilieva, Ye.G., Hrytsenko, A.V., Demekhin, V.L., Pugach, A.M., Pugach, S.M., Ilkovich, V.V., Riabets, A.V.* (2014), “Definition and Prediction of Neutron Fluence on SUNPP-2 Reactor Internals (Core Baffle): Technical Report on Stage 2” [Opredeleniie i prognozirovaniie fliuensa neitronov na vnutrikorpusnyie ustroistva (vygorodka) reaktora energobloka No. 2 OP Yuzhno-Ukrainskaia AES: Tekhnicheskii otchiot po etapu 2], Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine, 293 p. (Rus)

3. *Bukanov, V.N., Vasilieva, Ye.G., Gritsenko, A.V., Demekhin, V.L., Pugach, A.M., Pugach, S.M., Ilkovich, V.V., Riabets, A.V.* (2014), “Definition and Prediction of Neutron Fluence on Reactor Internals (Core Baffle, Reactor Cavity, Upper Internals) of ZNPP-1: Report on Stages 1, 3, 5 under Agreement 75/140–14” [Opredeleniie i prognozirovaniie fliuensa neitronov na vnutrikorpusnyie ustroistva (vygorodka, shakhta vnutrikorpusnaia, blok zashchitnykh trub) reaktora energobloka No. 1 OP ZAES: Otchiot po etapam 1, 3, 5 dogovora No. 75/140–14], Institute of Nuclear Research of NAS of Ukraine, 330 p. (Rus)

4. *Bukanov, V.N., Vasilieva, Ye.G., Gritsenko, A.V., Demekhin, V.L., Pugach, A.M., Pugach, S.M., Ilkovich, V.V., Riabets, A.V.* (2014), “Definition and Prediction of Neutron Fluence on Reactor Internals (Core Baffle, Reactor Cavity, Upper Internals) of ZNPP-2: Report on Stages 2, 4, 6 under Agreement 75/140–14” [Opredeleniie i prognozirovaniie fliuensa neitronov na vnutrikorpusnyie ustroistva (vygorodka, shakhta vnutrikorpusnaia, blok zashchitnykh trub) reaktora energobloka No. 2 OP ZAES: Otchiot po etapam 2, 4, 6 dogovora No. 75/140–14], Institute of Nuclear Research of NAS of Ukraine, 332 p. (Rus)

Получено 08.07.2016.