

Внутриреакторные измерения на Ново-Воронежской АЭС

С. С. ЛОМАКИН, Г. Г. ПАНФИЛОВ, В. И. ПЕТРОВ, Л. И. ГОЛУБЕВ,
В. П. КРУГЛОВ, Ю. А. БОРИСОВ, В. А. ВИГИН

УДК 621.039.512.45:621.311.2:621.039

Повышение надежности эксплуатации АЭС и выявление возможностей увеличения ее мощности существенным образом зависят от знания параметров поля нейтронов в работающем реакторе и их изменения со временем из-за выгорания топлива.

Для внутриреакторных измерений потока и спектра нейтронов на реакторе первого блока Ново-Воронежской АЭС оборудованы измерительные сухие вертикальные каналы (центральный и два боковых) с внутренним диаметром 5,5 мм, проходящие через топливные кассеты. Измерение плотности потока тепловых нейтронов в реакторе проводилось путем активации индикаторов из золота, лютеция, меди, марганца и кобальта, а также с помощью детекторов прямой зарядки (ДПЗ) и урановых камер деления.

Индикаторы из золота и меди использовались в виде фольг и проволоки, керамические индикаторы с лютецием и марганцем имели вид прессованных таблеток диаметром 3 мм, толщиной 0,4 мм, в которые были введены окиси указанных элементов в количестве 20 и 10 мг/см² соответственно. Индикаторы располагались внутри составной тонкостенной никелевой ампулы длиной 2,5 м, которая с помощью штанги вводилась в активную зону реактора.

В качестве чувствительного элемента в ДПЗ использовалась родиевая проволока диаметром 0,8 мм и длиной 180 мм, а в камерах деления — тонкий слой U²³⁵, нанесенный на катод диаметром 4 мм, длиной 50 мм. Сигнал от датчиков через усилитель постоянного тока типа И-37 подавался на регистрирующий прибор.

Для разделения тепловых и надтепловых нейтронов индикаторы из меди, золота и марганца облучались также в кадмиевых чехлах толщиной 0,5 мм.

Абсолютные измерения плотности потока нейтронов проводились в нескольких точках центрального канала по активации золотых фольг. Плотность потока нейтронов $n\nu_0$ определялась из соотношения

$$n\nu_0 = \frac{kN_s}{gG_T + r \sqrt{\frac{T}{T_0}} S_0 G_r},$$

где k — коэффициент, характеризующий детектор (сечение и т. д.) и эффективность счетной установки; N_s — активность насыщения фольги на единицу веса, мкБк/сек·мг; r , g , S_0 — параметры Весткотта [1]; G_T — коэффициент самоэкранирования и депрессии тепловых нейтронов; G_r — коэффициент резонансного самоэкра-

нирования; T — эффективная температура нейтронов; $T_0 = 293^\circ \text{K}$; $\nu_0 = 2200 \text{ м/сек}$. Коэффициент k определялся с помощью калиброванного гамма-источника.

Счетная установка состояла из сцинтилляционного гамма-счетчика с кристаллом иодистого натрия размером $40 \times 40 \text{ мм}$ и ФЭУ-81, эмиттерного повторителя, блока питания и пересчетного прибора ПП-9. Порог дискриминации устанавливался по фотопику γ -излучения Hg²⁰³.

Величину $r \sqrt{T/T_0}$ находили из соотношения [2]

$$r \sqrt{T/T_0} = \frac{g}{R_{Cd} G_T / k_\delta + (R_{Cd} - 1) S_0 G_r},$$

где k_δ — коэффициент, учитывающий толщину кадмиевого чехла; R_{Cd} — кадмиевое отношение ($k_\delta = 2,072$ [2]).

Плотность потока тепловых нейтронов со средней скоростью $\bar{\nu}$ определяли из выражения

$$n_T \bar{\nu} = 1,128 \sqrt{T/T_0} n\nu_0 \frac{R-1}{R},$$

где $R = k_\delta / r \sqrt{T/T_0}$ — кадмиевое отношение для детектора с сечением, пропорциональным $1/\nu$. Погрешность абсолютных измерений $n_T \bar{\nu}$ не превышает 10%.

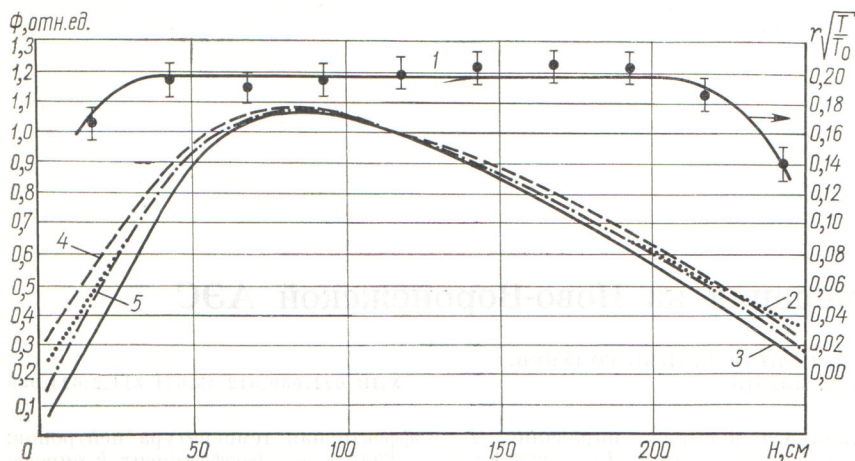
Спектральные характеристики поля нейтронов, а именно величина A , температура нейтронов T и параметр r [2], были измерены в центральном канале по высоте активной зоны. Величина

$$A = (A^{Lu}/A^{Mn})_x : (A^{Lu}/A^{Mn})_0,$$

где числитель и знаменатель — отношения активностей индикаторов из Lu¹⁷⁶ и Mn⁵⁵, измеренные в известном и известном калибровочном спектре соответственно. Калибровочные измерения проводились в спектре графитового реактора с эффективной температурой нейтронов $T = 348^\circ \text{K}$ и $r = 0,0541$. Погрешность измерения спектрального параметра A составляет примерно 4%.

Активности индикаторов измерялись после соответствующей выдержки. Порог дискриминации на входе ПП-9 устанавливался по фотопику Am²⁴¹ ($E_\gamma = 0,059 \text{ Мэв}$).

По измеренным значениям $r \sqrt{T/T_0}$ для золота и величине параметра A , определяемого соотношением



Р и с. 1. Относительные распределения по высоте бокового канала величины $r\sqrt{T/T_0}$ (1), потока $n_T v$ (2) и скоростей реакций, измеренных ДПЗ (3), камерой деления (4) и по активности медной проволоки (5):

H — расстояние от дна канала.

Весткотта [2],

$$A = \frac{g^{Lu}(T) G_T^{Lu} + r S^{Lu}(T) G_r^{Lu}}{g^{Mn}(T) G_r^{Mn} + r S^{Mn}(T) G_r^{Mn}},$$

были получены величины температуры нейтронов, погрешность определения которых составляет примерно 6%.

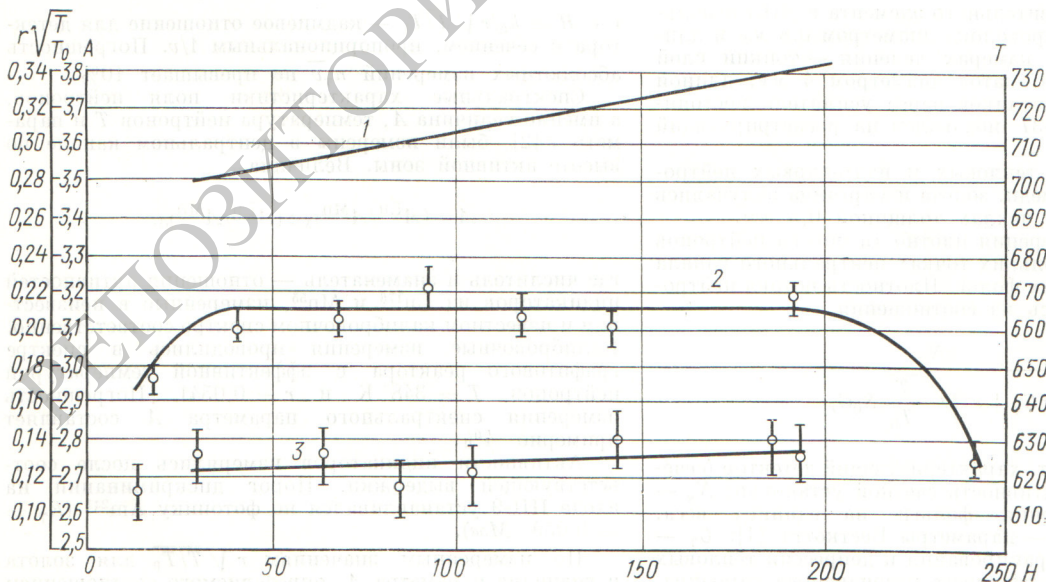
Результаты измерений представлены в таблице и на рис. 1 и 2.

Максимальные значения потока тепловых нейтронов составили: $n_T v = (6,8 \pm 0,7) \cdot 10^{13}$ нейтр/см²·сек (V кампания, мощность 235 Мвт) и $n_T v = (5,5 \pm 0,6) \cdot 10^{13}$ нейтр/см²·сек (VI кампания, мощность 215 Мвт). По величине $n_T v$ была определена чувствительность ДПЗ, которая составила $0,8 \cdot 10^{-19}$ нейтр/см²·сек.

Как показали измерения (см. рис. 1), относительные распределения активности проволоки, показаний каме-

Абсолютные значения потока тепловых нейтронов, измеренного по активации золота

Расстояние от дна канала, см	Активность деления $\times 10^{-9}$, имп/сек · мг	$r\sqrt{T/T_0}$	$n_T v \times 10^{-13}$, нейтр/см ² · сек	$n_T v \times 10^{-13}$, нейтр/см ² · сек	Выгорание в камере $T_{эфф}$, сутки
46	0,728	0,216	$2,6 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,4$	244
87	0,925	0,216	$3,3 \pm 0,3$	$4,9 \pm 0,5$	244
142	1,092	0,216	$3,9 \pm 0,4$	$5,8 \pm 0,6$	244
187	1,184	0,216	$4,2 \pm 0,4$	$6,3 \pm 0,6$	244
40	0,772	0,199	$2,9 \pm 0,3$	$4,4 \pm 0,4$	334
130	0,864	0,199	$3,2 \pm 0,3$	$4,9 \pm 0,5$	334



Р и с. 2. Распределение спектральных характеристик по высоте центрального канала:

1 — температура нейтронов, $T^\circ K$; 2 — параметр $r\sqrt{T/T_0}$; 3 — спектральный параметр A .

ры деления и ДПЗ имеют одинаковый характер и в центральной части канала совпадают в пределах ошибок измерений. Расхождение результатов наиболее существенно в нижней и верхней частях активной зоны. Частично оно обусловлено разным вкладом тепловых и резонансных нейтронов в активность меди и родия.

Соотношение между тепловыми и резонансными нейтронами в активной зоне также постоянно, кроме областей, граничащих с отражателем, где наблюдается

уменьшение величины $r \sqrt{\frac{T}{T_0}}$ (см. рис. 1 и 2). Для сравнения на рис. 1 приведено относительное распределение nv_0 , полученное по активности золотых фольг с учетом изменения параметра $r \sqrt{T/T_0}$ по высоте канала.

Как видно из рис. 2, величина A и температура нейтронов T линейно возрастают от низа к верху активной зоны. Это возрастание, связанное в опреде-

ленной мере с повышением температуры теплоносителя, свидетельствует об ужесточении спектра тепловых нейтронов в верхней части активной зоны реактора.

Подобные исследования характеристик поля нейтронов в реакторе позволили откалибровать измерительные каналы и дали возможность связать измеренные относительные величины потока нейтронов с его абсолютными значениями.

Поступило в Редакцию 20/II 1970 г.

В окончательной редакции 25/VI 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Westcott. AECL-1101, 1960.
2. C. Westcott et al. Proc. of the Second Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Unit. Nat. Vol. 16, Geneva, 1958, p. 70.

Профилирование гетерогенного реактора с небольшим числом ТВЭЛОВ

Н. Н. ПОНОМАРЕВ-СТЕПНОЙ, А. М. КРУТОВ, В. И. НОСОВ

УДК 621.039.512.45

При проектировании энергетических реакторов одной из важных задач является выравнивание поля энерговыделения в активной зоне. Особое значение эта задача приобретает для реакторов с небольшим числом ТВЭЛОВ вследствие сильной зависимости распределения энерговыделения от расположения отдельных ТВЭЛОВ по активной зоне, размещения органов регулирования и других факторов. При изучении профилирования энерговыделения в реакторах с небольшим числом ТВЭЛОВ эти факторы могут быть учтены на основе прямых гетерогенных расчетов [1, 2]. При теоретическом рассмотрении этой задачи делаются определенные предпосылки и допущения, поэтому возникает необходимость в экспериментальной проверке развитой гетерогенной методики расчета.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований распределения энерговыделения, которые сравниваются с результатами расчета по гетерогенной методике [1, 2].

Все исследования проводились на цилиндрической критической сборке с водой в качестве замедлителя. Активная зона набиралась из центрального и периферийных ТВЭЛОВ, которые располагались симметрично по трем окружностям (рис. 1). Набор дистанционирующих плит позволял варьировать радиусы расположения ТВЭЛОВ (R_1, R_2, R_3). Все измерения проводились с одинаковыми ТВЭЛАМИ из высокообогащенного урана (~90%). Активная зона была окружена боковым отражателем из бериллия, который отделялся от нее тонкой стальной оболочкой. В боковом отражателе были предусмотрены отверстия для регулирующих стержней. Радиус реактора $R_p \approx 1,7 R_{a.z.}$, эквивалентная высота активной зоны $H_{a.z.}^{эkv} \approx 2R_p$, диаметр твэла с оболочкой $d = 0,19 R_{a.z.}$.

Экспериментальное исследование распределения энерговыделения проводилось с помощью урановых детекторов, а также методом гамма-сканирования центральной части облученных ТВЭЛОВ. Среднеквадратичная ошибка, которая складывается в основном из статического разброса в измерениях, погрешностей

в фиксации времени, неопределенности в расположении детекторов и неустойчивости работы аппаратуры, составляет ~5%.

Первоначально была изучена серия гетерогенных критических сборок, у которых варьировались радиусы расположения ТВЭЛОВ. Эти эксперименты позволили установить зависимости в распределении энерговыделения по радиусу реактора, а также уточнить расчетные и экспериментальные методики.

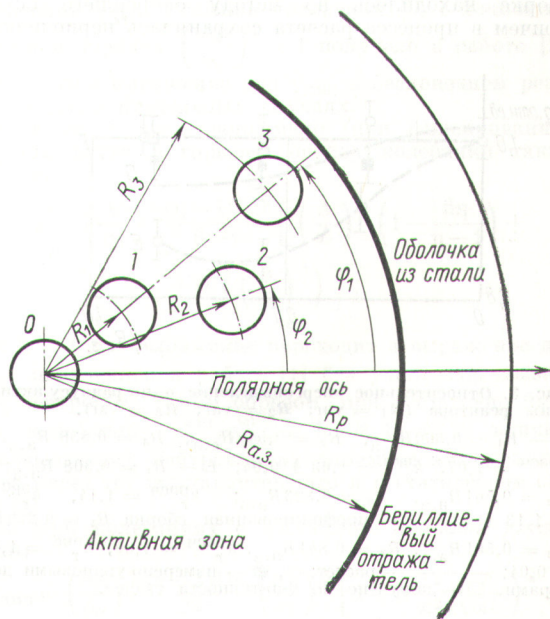


Рис. 1. Схема реактора с кольцевым расположением ТВЭЛОВ (0; 1, 2, 3 — номера ТВЭЛОВ; 0 — центральный ТВЭЛ).