

УДК 621.039.514

ПРИМЕНЕНИЕ ГАММА-НЕЙТРОННЫХ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ, ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ В РБМК-1000

*Александров С.И., Конопатов Р.В., Постников В.В., Хандамиров Ю.Э., Юркин Г.В.
(НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалы)*

Потребность в периодическом измерении распределения плотности потока тепловых нейтронов, энерговыведения и энергосовыработки в активной зоне РБМК-1000 связана с предусмотренной в эксплуатационной документации регулярной метрологической аттестацией информационно-измерительной системы Скала-микро, а также градуировкой внутриреакторных детекторов. Эти работы выполняются путем сканирования активной зоны гафниевыми детекторами Дт.6 по радиусу и камерами деления Кт-19 по высоте активной зоны, однако при измерении энерговыведения в ТВС детекторы не обеспечивают желаемой точности и не позволяют определить распределение энергосовыработки работающего реактора. Решение последней задачи необходимо для полноты аттестации системы Скала-микро и повышения в итоге безопасности не только реактора, но и хранилищ отработавшего ядерного топлива. Именно решению этих задач и посвящена настоящая работа.

В ней для сканирования на работающем реакторе специально предусмотренных для этой цели ТВС сборки 49 с сухими центральными трубками использовали двухсекционные триаксиальные ионизационные камеры Кт-18. Одна секция такой камеры является камерой деления с ^{235}U 90%-ного обогащения, другая — γ -камерой. В конструкции камер этого типа все электроды изготовлены из коррозионно-стойкой стали, изоляция — из спрессованного оксида магния, в качестве рабочего газа используется аргон [1]. Наружный диаметр камеры в активной зоне составляет 6 мм, длина чувствительной части каждой секции 50 мм, расстояние между центрами секций 85 мм. Отношение чувствительного и полного объема камеры деления и γ -камеры $\sim 0,047$. В процессе измерений камеры перемещали по высоте ТВС с помощью крана центрального зала с постоянной скоростью. Измерения проводили на первом блоке Курской АЭС 20 декабря 2004 г. на мощности 95% номи-

нальной. Были отсканированы 25 ТВС, часть из них по техническим причинам только на половину высоты активной зоны. Поэтому будем рассматривать значение любого параметра только для верхней половины ТВС, отмеченное индексом *. Сигналы секций регистрировали с помощью цифрового комплекса «Кентавр» с точностью до четвертого знака.

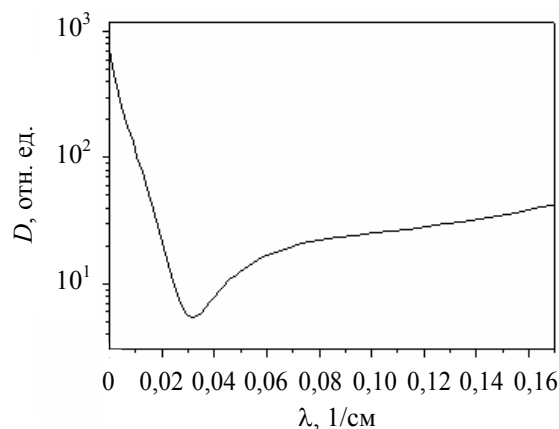
Измерение относительного распределения энерговыведения по высоте ТВС. При обработке измерений использовали расчетное распределение сигнала γ -чувствительной секции камеры по высоте ТВС в виде

$$J_{\gamma}^p(h) = \int_{H_{a.3}} W(h') \exp(-\lambda|h' - h|) dh' = F[W(h)],$$

где $W(h')$ — распределение энерговыведения по высоте ТВС; $H_{a.3}$ — высота активной зоны.

Величину λ определяли на основе сравнения расчетного J_{γ}^p и измеренного J_{γ}^u сигналов γ -чувствительной секции камеры. В качестве λ принимали $\lambda_{\text{опт}}$, обеспечивающую минимум дисперсии D отношения $J_{\gamma}^p/J_{\gamma}^u$ (рис. 1), т.е.

$$D \left[\frac{J_{\gamma}^p(\lambda_{\text{опт}})}{J_{\gamma}^u} \right] = \min.$$



Р и с. 1. Зависимость дисперсии $D(J_{\gamma}^p/J_{\gamma}^u)$ от коэффициента λ для ТВС энергосовыработкой 319 МВт-сут

В расчетах J_γ^p в качестве распределения $W(h')$ использовали аксиальное распределение плотности делений, измеренное камерой деления в свежей ТВС, где относительная форма этих распределений почти совпадает.

Проводили сравнение распределения сигнала $J_\gamma(h)$ γ -камеры в свежих ТВС с распределением энерговыделения, в качестве которого использовали распределение сигнала $N_f(h)$ камеры деления. Среднеквадратичное расхождение между этими распределениями зависело от характера распределений и могло быть значительным 1,5—4%. Для повышения точности определения аксиального распределения энерговыделения по сигналу γ -камеры обработку ее сигнала проводили в следующей последовательности.

Принимали, что

$$\frac{J_\gamma(h) \overline{W(h)}}{W(h) J_\gamma(h)} \approx K_1(h) = \frac{F[J_\gamma(h)] \overline{J_\gamma(h)}}{J_\gamma(h) F[J_\gamma(h)]}.$$

В первой итерации получали

$$W_1^p(h) = J_\gamma(h) / K_1(h),$$

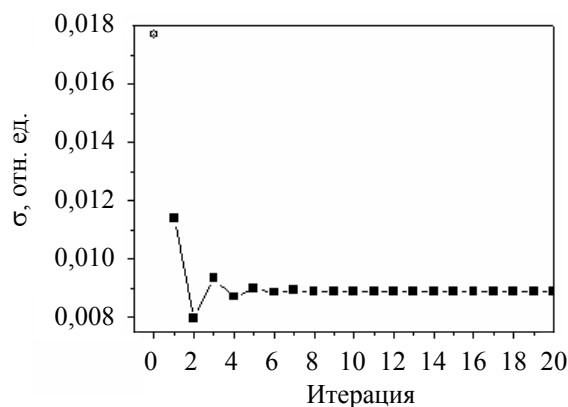
в j -й итерации

$$K_j(h) = \frac{F[W_{j-1}^p(h)] \overline{J_\gamma(h)}}{J_\gamma(h) F[W_{j-1}^p(h)]};$$

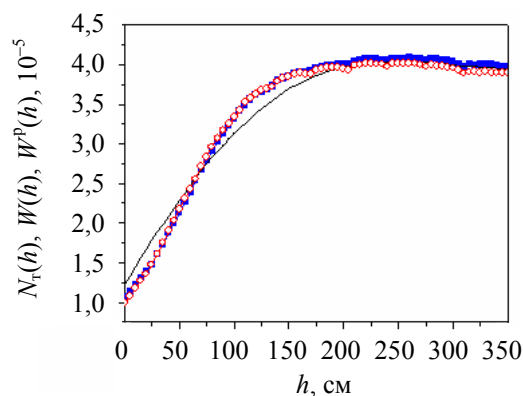
$$W_j^p = \frac{W_{j-1}^p(h)}{[K_{j-1}(h) - 1]0,6 + 1}.$$

Среднеквадратичное расхождение $\sigma(W/N_f)$ между распределением энерговыделения $W^p(h)$, полученным в результате такой процедуры (рис. 2), и распределением сигнала камеры деления $N_f(h)$ для свежих ТВС составляло 0,9—1,1%.

Почти совпадающие относительные распределения $N_f(h)$, $W^p(h)$ для свежей ТВС выгоранием 319 МВт·сут находятся в удовлетворительном согласии с распределением энерговыделения $W(h)$, рассчитанным по программе Призма-М информационно-измерительной системы Скала-микро (рис. 3).



Р и с. 2. Зависимость среднеквадратичного отклонения отношений аксиального распределения плотности потока нейтронов к восстановленному итерационным методом энерговыделению в ТВС 43-66 энерговыработкой 319 МВт·сут от числа итераций: ■ — $\sigma[N_f(h)/W_j^p(h)]$; ○ — $\sigma[J_\gamma(h)/J_\gamma^p(h)]$



Р и с. 3. Аксиальное распределение в активной зоне сигнала камеры деления $N_f(h)$ (■), энерговыделения, рассчитанного по программе «Призма-М» (—) и полученного на основе измерений γ -камерой (○), в ТВС 43-66 энерговыработкой 319 МВт·сут

Определение тепловой мощности ТВС по показаниям γ -камеры. Объем газа в магнетиальной изоляции линии связи примерно в 3 раза больше полного объема камеры. При этом камера, включая линию связи, находится в канале, охлаждаемом кипящим теплоносителем при одинаковой температуре около 300 °С. Поэтому изменения чувствительности γ -камеры из-за разности температуры электродов (не более 30 °С) и перетечек газа невелики и его учитывали по формуле

$$K_\gamma(t) = \left\{ 1 + \left[\frac{J_\gamma^*(t_2) \overline{W}^*(t_1)}{\overline{W}^*(t_2) J_\gamma^*(t_1)} - 1 \right] \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \right\}^{-1},$$

где $W^*(t)$ — мощность ТВС, рассчитанная в информационно-измерительной системе Скала-микро в момент времени t ; $J_\gamma(t)$ — средний сигнал γ -камеры по высоте ТВС; t_1, t_2 — время первого и второго измерений в одной и той же ТВС.

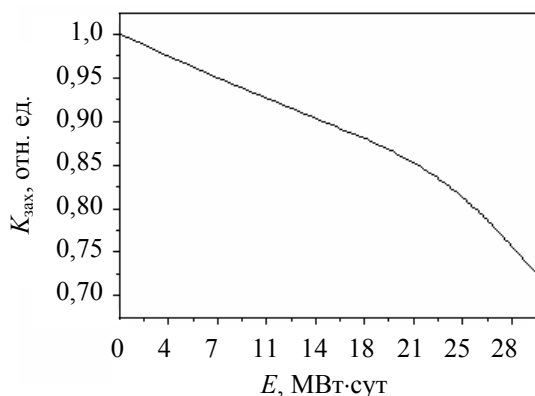
Общее изменение чувствительности γ -камеры за время измерений составило 5%.

Затем учитывали вклад захватного и запаздывающего γ -излучения ТВС разной энерговыработки соответственно с помощью коэффициентов $K_{\text{зах}}$ и $K_{\text{зап}}$. Коэффициент $K_{\text{зах}}$ определяли на основе расчетной зависимости для одной из разновидностей ТВС (обогащение 2,6% по ^{235}U с эрбиевой добавкой в топливе) (рис. 4). $K_{\text{зап}}$ рассчитывали с помощью выражения [2]

$$K_{\text{зап}} = \left[\gamma_1 + \gamma_2 \frac{\sum_{j=1}^n A_j / \lambda_j (1 - \exp(-\lambda_j T))}{\sum_{j=1}^n A_j / \lambda_j} + \gamma_3 \right]^{-1},$$

где T — время работы ТВС в активной зоне; A_j, λ_j — константы [2]; $\gamma_1 = 0,52, \gamma_2 = 0,48$ — доля мгновенного и запаздывающего γ -излучения [3] в ТВС действующего реактора; $\gamma_3 = 0,36$ — доля захватного γ -излучения при $T = 0$. Коэффициент $K_{\text{зап}}$ близок к 0,735 для ТВС с максимальным (примерно 1500 МВт·сут) и к 0,75 для ТВС с низким 16 МВт·сут выгоранием.

Поскольку в расчете мощности ТВС необходимо использовать γ -излучение, испускаемое только в ней, оценивали вклад в сигнал γ -камеры излучения соседних ТВС. При этом расчетный сигнал γ -камеры представляли в виде



Р и с. 4. Зависимость коэффициента, учитывающего захватное γ -излучение, от энерговыработки

$$J_{\gamma j}^p = \text{const} \sum_{i \in \Omega_j}^{n_j} W_{ij}^* a_i; \quad n_j = 0, \dots, 8, \quad (1)$$

где W_{ij}^* — мощность i -й ТВС в районе j -й γ -камеры, рассчитанная в информационно-измерительной системе Скала-микро.

Коэффициенты a_i определяли путем минимизации дисперсии (рис. 5)

$$D_\gamma = D \left(\frac{J_{\gamma j}^p(h)}{J_{\gamma j}^s(h)} \frac{\overline{J_{\gamma j}^p(h)}}{\overline{J_{\gamma j}^s(h)}} \right) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Таким способом были получены коэффициенты

$$a_0 = 1; a_1 = 0,022; a_2 = 0,005,$$

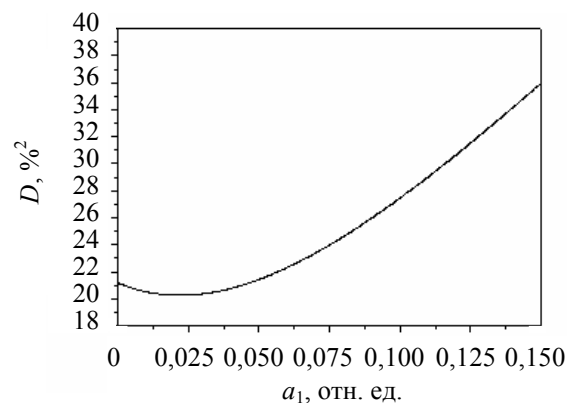
где a_0, a_1, a_2 — коэффициенты для ТВС с γ -камерой, ближайшей ТВС и ТВС, расположенной по диагонали, соответственно.

В соответствии с соотношениями (1), (2) поправочный коэффициент, учитывающий вклад γ -излучения соседних ТВС в сигнал γ -камеры, рассчитывали как

$$K_{\gamma j} = W_{0j} / \sum_{i \in \Omega_j}^{n_j} W_{ij} a_i.$$

Вносили также поправочный коэффициент $K_{\gamma j}(E)$, учитывающий различие вклада в сигнал камеры γ -излучения периферийных и внутренних твэлов ТВС с ростом ее энерговыработки. Его увеличение при изменении энерговыработки от 0 до 3000 МВт·сут составляло примерно 1%.

С учетом всех поправок получили сигнал γ -камеры $J_{\gamma j}^c$, пропорциональный мощности j -й



Р и с. 5. Зависимость дисперсии от коэффициента a_1 с фиксированными коэффициентами a_0 и a_2

ТВС W_{γ}^* . Окончательно считали, что мощность j -й ТВС

$$W_{\gamma}^* = \text{const } J_{\gamma}^c K_{\gamma j} K_{\text{защ}j} K_{\text{зап}} K_{\text{л}j} K_{\text{т}j}, \quad (3)$$

где J_{γ}^c — средний по высоте j -й ТВС сигнал γ -камеры.

Поправки, вносимые согласно уравнению (3), невелики, и каждый коэффициент, кроме $K_{\text{защ}}$, имеет среднеквадратичное отклонение от среднего значения не более 1—1,5%.

Примером такого применения γ -камеры можно считать результат сравнения мощности ТВС, полученной согласно уравнению (3), с мощностью, рассчитанной в информационно-измерительной системе Скала-микро, — он указывает на малую зависимость их отношения от радиуса реактора (рис. 6).

Определение зависимости энерговыработки ТВС от отношения сигнала γ -камеры к сигналу камеры деления. Нахождению зависимости также предшествовали оценка и учет дрейфа f отношения сигналов γ - и нейтронной камер, определяемого как разность в повторном и первом измерении отношения в одной и той же ТВС, деленная на число измерений между ними. Кроме того, в сигнал γ -камеры вносили все поправки согласно уравнению (3).

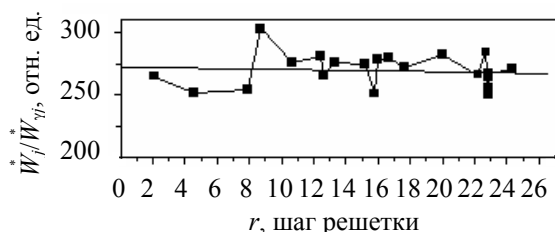
Кривая (рис. 7), аппроксимирующая значения отношения сигнала γ -камеры к сигналу камеры деления при различной энерговыработке ТВС E_i , имеет вид

$$J_{\gamma i}/N_{fi} = m(E_i) = b_0 + b_1 E_i + b_2 E_i^{1,5}, \quad (4)$$

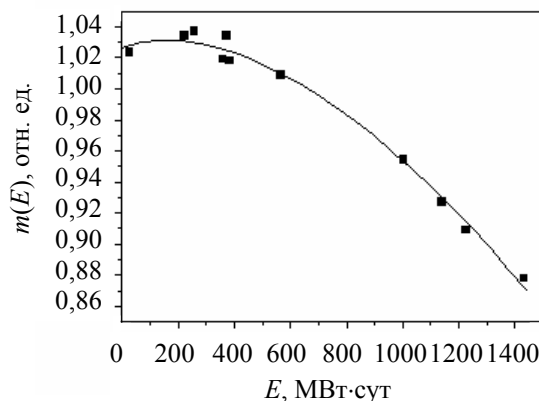
$i = 1, \dots, n_{\text{изм}}$

где $n_{\text{изм}}$ — число измерений.

Значения коэффициентов b_0, b_1, b_2 определяли решением системы (4) методом наименьших квадратов.



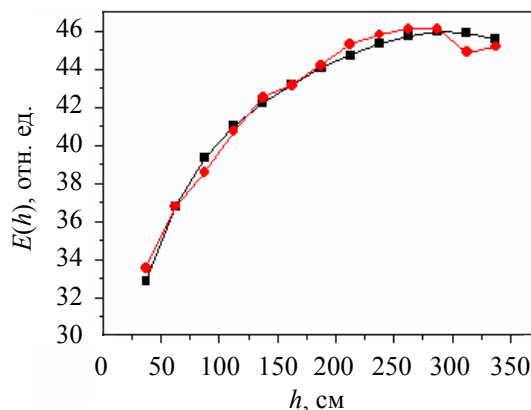
Р и с. 6. Зависимость отношения W_{γ}^*/W_{γ} и аппроксимирующего полинома первой степени от радиуса r активной зоны



Р и с. 7. Откорректированные отношения токов γ - и нейтронной камер, аппроксимирующей их зависимости $m(E)$ от энерговыработки ТВС: ■ — полусумма двух измеренных отношений J_{γ}/N_f для близких значений E

Расчетная среднеквадратичная погрешность зависимости $m(E)$ составляет 0,8%. Среднеквадратичную погрешность аппроксимационной кривой оценивали на основе моделирования случайной погрешности измерений в точках измерений по оси энерговыработки. Зависимость на рис. 7 включает, в частности, возможные спектральные эффекты, γ -чувствительность нейтронной камеры и др. Ввиду слабой зависимости коэффициента размножения ячейки $k_{\infty}(E)$ и $m(E)$ при начальной энерговыработке ТВС меньше 400 МВт·сут аппроксимирующую зависимость $m(E)$ следует использовать при больших значениях энерговыработки.

На рис. 8 сравнивается аксиальное распределение энерговыработки, определенное по зависимости $m(E)$, с рассчитанным по программе Призма-М информационно-измерительной системы Скала-микро. Среднеквадратичное расхождение между этими двумя распределениями,



Р и с. 8. Относительное аксиальное распределение энерговыработки $E(h)$, рассчитанное по программе Призма-М (■) и полученное на основе измерений камерой Кт-18 (●) в ТВС 33-23 энерговыработкой 1122 МВт·сут

приведенное к максимальному значению, составляет 1,3% для ТВС энергоснабжением 1122 МВт·сут.

Таким образом, можно констатировать, что разработанная методика прямых измерений трехмерных распределений энерговыделения и энерговыработки в ТВС РБМК на работающем реакторе с помощью гамма-нейтронной камеры дает результаты, хорошо совпадающие с результатами расчетов по программе Призма-М. Экспериментально подтверждена возможность применения программы Призма-М информационно-

измерительной системы Скала-микро для контроля энерговыработки выгружаемых ТВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. Защита ядерных реакторов. Пер. с англ. под ред. С.Г. Цыпина. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1958.
3. Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.В. Ядерно-физические константы. М.: Госатомиздат, 1963.

Поступила в Редакцию 20.03.07

УДК 621.039.647

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МИШЕНИ НА СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОМ СПЛАВЕ

*Безносков А.В., Мелузов А.Г., Новожилова О.О. (Нижегородский гос. техн. ун-т),
Ефанов А.Д. (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)*

Традиционно рассматриваются две конструктивные схемы жидкометаллической мишени ускорительно-управляемой системы. Одна предполагает наличие металлической стенки (окна, заглушки, перегородки), которая разделяет полости ускорителя с глубоким вакуумом и жидкометаллической мишени, находящейся под давлением. В такой мишени трудно обеспечить работоспособность стенки, разделяющей полости ускорителя и мишени. Эта стенка находится в потоке частиц с высокой энергией, в контакте с жидкометаллическим теплоносителем в условиях температурных пульсаций. Другая схема, рассматриваемая в настоящей статье, предполагает отсутствие стенки, но в данной конструкции необходимо исключить превышение давления в рабочей полости мишени давления в полости ускорителя во всех нормальных и аварийных режимах работы мишенного контура. В противном случае возможно поступление в полость имитатора патрубка подвода ускоренных частиц жидкого металла, содержащего примеси — продукты ядерных реакций ускоренных частиц и тяжелых ядер, в том числе опасных радионуклидов.

Ускорители частиц и ось патрубка ввода ускоренных частиц всегда располагаются в горизонтальной плоскости. Необходимо устройство поворота потока ускоренных частиц перед их вводом в мишень при вертикальном расположении оси. Наличие такого устройства ухудшает

экономические характеристики ускорительно-управляемой системы.

Цель экспериментов, описанных в статье, — определение условий незатекания жидкого металла в полость имитатора патрубка мишени при вертикальном и горизонтальном расположении их осей в диапазоне рабочей температуры и расхода свинцово-висмутовой эвтектики через проточную часть модели натуральных размеров.

Экспериментальный стенд. Испытания проводили на базовом циркуляционном стенде ФТ-1, в состав которого входило следующее оборудование: электронасос с регулированием числа оборотов, номинальная частота вращения 1000 об./мин, расход — до $10 \cdot 10^4$ кг/ч, буферная емкость общим объемом $0,6 \text{ м}^3$, из них $0,3 \text{ м}^3$ — объем эвтектики и $0,3 \text{ м}^3$ — объем защитного газа, расходомерный бак, магнитный расходомер, электрообогреваемые трубопроводы и арматура из стали 08X18H10T внутренним диаметром 25, 40 и 60 мм, системы защитного газа и заполнения и дренажа теплоносителя. Стенд оснащен компьютеризированной системой сбора, обработки и представления информации, системами управления оборудованием и регулирования параметров, силового электроснабжения и охлаждения.