

Применение гамма-камер для измерения мощности топливных каналов реактора Белоярской АЭС

И. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, В. И. АЛЕКСЕЕВ, Л. В. КОНСТАНТИНОВ, В. В. ПОСТНИКОВ,
Ю. М. СЕРЕБРЕННИКОВ, Э. И. СНИТКО, Г. А. ПАШАРИН

УДК 621.039.311.2:621.039

В настоящее время проблеме контроля за энерговыделением в реакторах уделяется большое внимание. Это объясняется, в частности, тем, что увеличение энергонапряженности современных АЭС приводит к уменьшению различия между фактическими и предельно допустимыми тепловыми нагрузками твэлов. Для непрерывного внутриреакторного контроля за распределением энерговыделения используются различные датчики, в том числе малогабаритные камеры деления, гамма-камеры [1, 3], радиационные детекторы [2], урановые и гамма-термопары [3, 4]. Для периодических измерений обычно применяются активационные методы [5, 6]. Существенный недостаток нейтронных детекторов, установленных стационарно в реактор с высоким потоком нейтронов ($5 \cdot 10^{13}$ нейтр/см²·сек), — изменение их чувствительности за счет выгорания нейтрончувствительных элементов детекторов. Разработаны методы, позволяющие сохранить постоянной чувствительность детекторов нейтронов путем использования смеси из делящихся материалов [4]. Однако и в этом случае соотношение между показаниями детекторов и мощностью будет изменяться в результате выгорания горючего.

В настоящей работе исследовалась возможность измерения мощности испарительных каналов реактора Белоярской АЭС путем определения интенсивности γ -излучения с помощью ионизационной гамма-камеры. Основные достоинства детекторов γ -излучения — постоянство их чувствительности и практическая неизменность соотношения между полной энергией γ -излучения деления и скоростью делений в некоторой области активной зоны при квазистационарных режимах работы реактора. Конструкция испарительного канала реактора Белоярской АЭС [7] позволяет разместить пони-

зационную камеру в центральной трубке канала, по которой теплоноситель подается в твэлы. Если длина рабочего объема камеры совпадает с активным участком канала, то ток камеры будет пропорционален мощности канала.

Мощность дозы γ -излучения и энерговыделение в топливном канале. В результате акта деления ядра U^{235} около 7,5 Мэв энергии уносится γ -квантами спустя ~ 1 мксек после деления. Запаздывающее γ -излучение продуктов деления составляет 5,5 Мэв, причем 4,5 Мэв из них выделяется за время от 1 мксек до 15 мин после деления [8]. При стационарном режиме работы реактора интенсивность γ -излучения, возникающего в результате деления и распада продуктов деления, пропорциональна скорости делений горючего в некоторой области активной зоны. Помимо указанных γ -квантов в реакторе имеется захватное и активационное γ -излучение, которое пропорционально потоку нейтронов. Соотношение между указанными составляющими γ -излучения определяется типом, а также конструктивными и технологическими особенностями активной зоны.

В переходных режимах работы реактора изменение интенсивности γ -квантов будет запаздывать относительно изменения скорости делений за счет γ -квантов продуктов деления. В связи с тем что для энергетических реакторов скорость изменения мощности определяется технологическими причинами и обычно невелика, сигнал датчика γ -излучения будет изменяться практически в соответствии с изменениями скорости делений в некотором объеме активной зоны, окружающем датчик. Кроме того, возможно использование аналоговых или цифровых корректирующих устройств [9], которые позволяют учесть и исключить влияние запаздывающих γ -квантов продуктов деления. При относи-

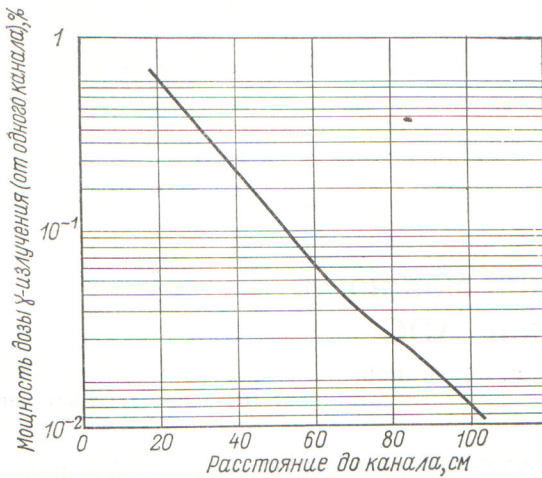


Рис. 1. Зависимость мощности дозы γ -излучения от расстояния до топливного канала.

тельных измерениях поля энерговыделения, практически сохраняющего свою форму, погрешность, обусловленную запаздыванием, можно уменьшить путем непрерывной нормировки токов отдельных камер на суммарный ток всех камер. Эксперименты, проведенные с укороченными макетами (диаметр 6 мм, длина 50 см, зазор между электродами 1 мм) на реакторе типа ИРТ, показали, что ток камеры I связан с мощностью дозы γ -излучения D в месте расположения камеры и давлением газа в камере P соотношением

$$I = kPD, \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от типа газа, расстояния между электродами, материала электродов и т. д. Соотношение (1) для упомянутых камер выполняется при изменении давления от 0,1 до 2 атм и при мощности дозы γ -излучения до 10^9 р/ч с погрешностью, не превышающей $\sim 2\%$.

Для реактора Белоярской АЭС была рассчитана интенсивность γ -квантов, выраженная в единицах мощности дозы, на оси топливного канала в месте расположения гамма-камеры. В расчетах топливный канал рассматривался как гомогенный цилиндрический источник бесконечной высоты [10].

Для номинальной мощности реактора Белоярской АЭС результаты расчета интенсивности γ -излучения (в р/ч) в топливном канале, усредненной по активной зоне, приведены ниже.

Мгновенное излучение деления.	$1,33 \cdot 10^7$
Излучение продуктов деления.	$1,15 \cdot 10^7$

Захватное излучение.	$6,3 \cdot 10^6$
Активационное излучение.	$1,4 \cdot 10^5$
Суммарное излучение, обусловленное	
мгновенными эффектами.	$1,96 \cdot 10^7$
полное излучение.	$3,1 \cdot 10^7$
Запаздывающая компонента излучения	$1,16 \cdot 10^7$

Как видно, расчетные мгновенные эффекты составляют 63% полной мощности дозы γ -излучения. К мгновенным отнесены γ -кванты, которые испускаются за время до 1 сек после деления.

Был рассчитан также вклад γ -излучения окружающих топливных каналов по методике, изложенной в работе [10]. Результаты расчета приведены на рис. 1. Учитывая влияние излучения окружающих топливных каналов, мощность дозы в канале с камерой целесообразно представить в виде

$$D = D_0 + \sum_{i=1}^{n-1} D(r_i), \quad (2)$$

где D_0 — мощность дозы, обусловленная каналом, в котором установлена камера; $D(r_i)$ — мощность дозы, обусловленная каналом, находящимся на расстоянии r_i от камеры; n_i — количество каналов в реакторе. Суммирование в выражении (2) проводится по всем топливным каналам.

Как показали расчеты (см. рис. 1), вклад γ -излучения окружающих каналов составляет 12% для центральной области реактора и 10% для периферийных каналов. Интенсивность γ -излучения в канале с камерой целесообразно выразить в виде

$$D_0 = Dk_p, \quad (3)$$

где k_p — расчетный коэффициент, учитывающий влияние окружающих топливных каналов; он зависит от расположения окружающих топливных каналов, но практически не зависит от изменения распределения энерговыделения в процессе кампании.

Результаты экспериментов. Испытания гамма-камер проводятся в реакторе первого блока Белоярской АЭС с 1966 г., когда в реактор была установлена опытная партия из 10 камер. Каждая из них представляет собой ионизационную двухэлектродную камеру с цилиндрической геометрией электродов. Ее корпус (заземленный электрод) представляет собой трубку из нержавеющей стали размером 6×1 мм. В корпус вставляется центральный высоковольтный и собирающий электрод из нержавеющей стали диаметром 2 мм. На центральном

электроды размещены дистанционирующие изоляторы из окиси алюминия или кварцевого стекла длиной 10—15 мм с интервалом на активной зоне 100 мм. Вне активной зоны пространство между электродами сплошь заполнено изоляторами.

Межэлектродное пространство на протяжении 6 м образует рабочий объем камеры, который заполнен аргоном до давления 760 мм рт. ст. Общая длина камеры ~13 м. Герметизация камеры осуществляется металлокерамическим изолятором. К корпусу камеры приварены центрирующие фиксаторы, обеспечивающие аксиальное положение ее в центральной трубке канала, а верхняя часть имеет специальный узел для герметизации топливного канала. Камеры охлаждаются водой первого контура при температуре ~300° С и давлении 100—130 атм. Рабочее напряжение не превышает 100 в. Вольт-амперные характеристики одной из камер при остановленном реакторе и при его работе на номинальной мощности представлены на рис. 2.

Для учета различия в чувствительности все камеры перед установкой в реактор помещали в отработавший топливный канал для определения градуировочных коэффициентов $k_{гр}$, представляющих собой величину, обратную относительной чувствительности камер. В процессе испытаний был получен также тарировочный коэффициент, позволяющий от тока перейти непосредственно к мощности топливного канала (в киловаттах). Тарировка камер проводилась на стационарной мощности реактора путем сопоставления токов и мощности соответствующих топливных каналов, измеренной в «некипящем» режиме и рассчитанной по методике работы [11]. При тарировке учитывались относительная градуировка камер и конкретная расстановка, а также тип близлежащих топливных каналов. Средний тарировочный коэффициент $\bar{k}_т$ оказался равным $0,61 \pm 0,02$ квт/мкА (здесь приведена среднеквадратичная погрешность). Мощность топливного канала W по току I определялась из выражения

$$W = k_{гр} k_p k_t I. \quad (4)$$

Следует отметить, что измеренные значения I отличались от значений, рассчитанных по формуле (1), не более чем на 20%.

Проверка линейности проводилась для гамма-камеры, расположенной в периферийном топливном канале путем сравнения ее тока с показаниями нейтронной камеры, находящейся

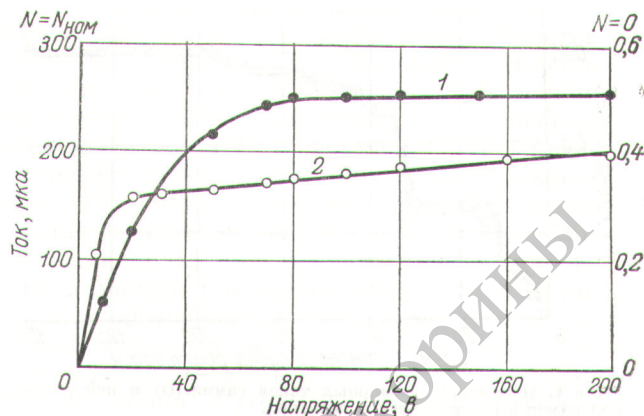


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика камеры при номинальной (1) и «нулевой» (2) мощностях реактора.

ся за отражателем на расстоянии ~70 см (рис. 3). Разрыв и изменение наклона прямой на рис. 3 обусловлены закипанием воды в топливном канале, где находится гамма-камера. Нейтронные камеры не фиксируют изменения агрегатного состояния теплоносителя и связанного с этим изменения мощности канала.

На рис. 4 показано изменение суммарных токов гамма- и нейтронных ионизационных камер в процессе подъема мощности реактора.

Взаимная нормировка токов нейтронных и гамма-камер была проведена через 270 ч после начала увеличения мощности. Влияние окружающих каналов на ток гамма-камеры было измерено на остановленном реакторе. Для этого гамма-камера последовательно помещалась в облученный и свежий топливные кана-

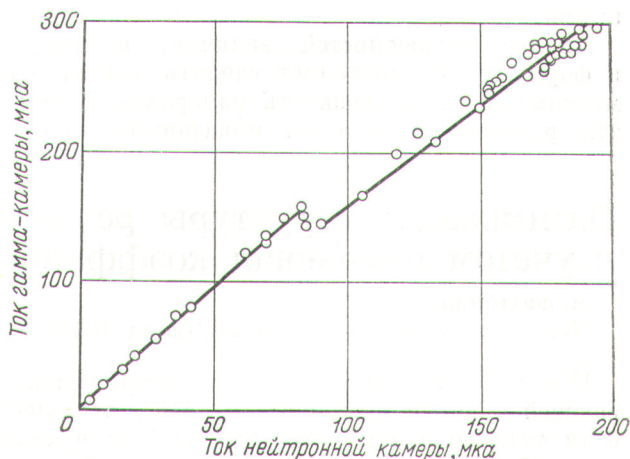


Рис. 3. Зависимость тока гамма-камеры от тока нейтронной камеры в процессе подъема мощности реактора.

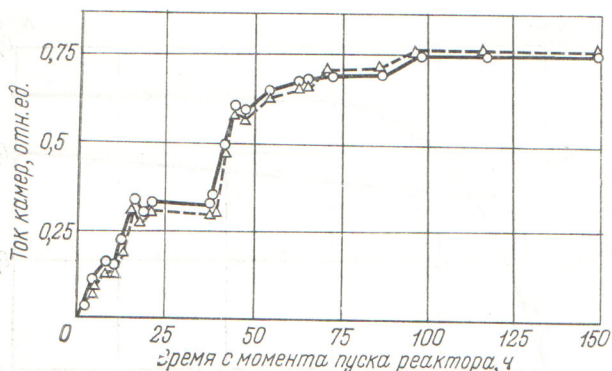


Рис 4. Изменение суммарных токов гамма-(O) и нейтронных (Δ) камер в процессе пуска реактора.

лы, которые последовательно помещались в одну и ту же ячейку реактора. Ток гамма-камеры в свежем канале составлял 8% тока камеры в облученном канале, что удовлетворительно согласовалось с расчетной величиной 7%, полученной с учетом деформации спектра для остановленного реактора по упомянутой выше методике. «Мгновенная» составляющая тока гамма-камеры определялась экспериментально с помощью осцилляторной установки [12], по величине отношения относительных амплитуд токов в гамма- и нейтронной камерах.

Колебания мощности задавались осцилляторной установкой и стержнем ручного регулирования, находящимся на противоположной относительно камер стороне реактора. Частота колебаний составляла 0,2; 0,4 и 0,025 гц. Для этих частот величина отношения относительных амплитуд токов гамма- и нейтронной камер составила $\sim 0,63$ и в пределах погрешности измерения совпала с расчетными значениями.

Анализ погрешностей величин, входящих в формулу (4), позволяет сделать вывод, что максимальная погрешность измерения мощности рабочего канала по показаниям гамма-

камеры, находящейся в этом канале, не превышает 7%.

Проведенные оценки показывают, что для определения мощности любого топливного канала реактора первого блока Белоярской АЭС с максимальной погрешностью 12% в реактор необходимо установить около 100 гамма-камер. Такие камеры наряду с другими типами датчиков можно рекомендовать для измерения распределения мощности в уран-графитовых реакторах канального типа.

В заключение авторы выражают признательность Б. Г. Дубовскому, Ю. В. Евдокимову, В. Г. Зыкину за содействие в работе, полезные советы и замечания в процессе проведения испытаний, а также Ю. М. Потатуеву и В. П. Головину — за участие в испытаниях гамма-камер.

Поступила в Редакцию 15/XII 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Loosmore, J. Dennis. J. Brit. Nucl. En. Soc, 1, No. 2, 109 (1962).
2. М. Мительман и др. «Атомная энергия», 10, 72 (1961).
3. A. Lapsley. Nucleonics, 16, No. 2, 106 (1958).
4. H. Ager-Hanssen, R. Smith. Nucleonics, 22, No. 4, 49 (1964).
5. W. Leggett. Transactions A. N. S., 9, No. 2, 484 (1966).
6. C. Smith. Transactions A. N. S., 8, No. 1, 71 (1965).
7. Н. А. Доллежалъ и др. В кн. «Тр. Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958). Докл. советских ученых.» Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 36.
8. K. Way, E. Wigner. Phys. Rev., 73, 1318 (1948).
9. H. Weiss. Nuclear Electronics Conf. Proc., Bombay Nov (1965), papers № 22/2, 461—474.
10. Н. Г. Гусев и др. Защита от излучений протяженных источников. М., Госатомиздат, 1961.
11. Н. А. Доллежалъ и др. «Атомная энергия», 27, 379 (1969).
12. А. И. Ефанов и др. «Атомная энергия», 20, 437 (1966).

Оптимизация структуры развивающейся системы АЭС с учетом изменения коэффициента нагрузки

В. ФРАНКОВСКИ

(Институт ядерных исследований, Сверк, ПНР)

УДК 621.036

При расчете оптимальной структуры развивающейся во времени системы АЭС, в случае если установленная мощность АЭС не превышает 25—30% суммарной установленной мощности энергосистемы в течение всего рассматри-

ваемого периода, можно принять, что коэффициент нагрузки АЭС является постоянным, и решать задачу с применением методов линейного программирования [1]. Однако если установленная мощность АЭС превысит определен-