

СТАТЬИ

УДК 621.039.564.2

ИЗМЕРЕНИЕ АБСОЛЮТНОЙ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА МАТР-2 МОДИФИЦИРОВАННЫМ ЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

Морозов С.А., Ковтун С.Н., Прохорова Л.И., Макаренков Ю.Д., Шутов С.С.,
Шутов П.С. (ГНЦ РФ—ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

Для решения некоторых задач реакторной физики и техники часто бывает необходимо определить абсолютную мощность реактора до его выхода на уровень, когда эта величина может быть измерена по балансу тепла. Обычно абсолютную мощность измеряют классическими способами — методами калиброванной камеры абсолютного счета с известным числом делящегося вещества, калибровочного источника нейтронов или активации вещества с известным сечением. Указанные методы имеют недостатки, связанные, в основном, с трудностью измерения пространственного распределения энерговыделения в активной зоне, калибровкой камер и источников. Методы требуют введения в активную зону ядерных реакторов каких-либо индикаторов, например, фольг или нейтронных детекторов, что не всегда возможно.

В 60-е годы для измерения абсолютной мощности были предложены два статистических метода. Первый — дифференциальный метод предложен Е. Беннетом [1] и подробно теоретически обоснован Л. Палом. Однако он не получил широкого распространения вследствие больших временных затрат на его реализацию, хотя позволял определять мощность реактора с приемлемой погрешностью.

Более широкое применение нашел второй частотный метод Р. Шредера [2], который основан на спектральном анализе шумов тока ионизационного нейтронного детектора, регистрирующего поток нейтронов реактора.

Как известно, в рамках одноточечной модели кинетики реактора спектральная плотность шумов тока ионизационной камеры, помещенной в реактор, в области частот $f \gg \lambda_{\max}/2\pi$ (где $\lambda_{\max}$ — максимальная константа распада предшественников запаздывающих нейтронов) определяется следующим выражением [2] (рис. 1):

$$S(f) = 2q^2\epsilon \frac{n_0}{l} \left[1 + \frac{\bar{\nu}^2 - \bar{\nu}}{\bar{\nu}} \frac{\epsilon}{\beta_{\text{эф}}^2} \frac{\alpha^2}{(2\pi f)^2 + \alpha^2} \right], \quad (1)$$

где q — заряд в детекторе на один поглощенный нейтрон, Кл;
 ϵ — эффективность детектора, равная отношению скорости регистрации нейтронов в детекторе к числу делений нейтронов в реакторе в секунду; n_0 — полное число нейтронов в реакторе;
 l — среднее время жизни мгновенных нейтронов в реакторе,
с; $\bar{\nu}$ — среднее число нейтронов на один акт деления; $\beta_{\text{эф}}$ — эффективная доля запаздывающих нейтронов; f — частота, Гц; $\alpha = \beta_{\text{эф}}/l$.

Величина $S(f)$ имеет размерность $\text{А}^2/\text{Гц}$.

Из выражения (1) следует, что спектральная плотность шумовой составляющей тока нейтронного детектора имеет два характерных значения:

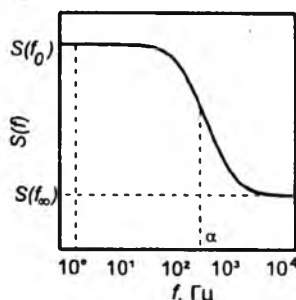


Рис. 1. Спектральная плотность мощности тока ионизационного детектора, помещенного в реактор

$$S(f_0) = 2q^2 \varepsilon \frac{n_0}{l} \left[1 + \frac{\bar{v}^2 - \bar{v}}{\bar{v}} \frac{\varepsilon}{\beta_{\text{эф}}^2} \right],$$

$$S(f_\infty) = 2q^2 \varepsilon \frac{n_0}{l}, \quad (2)$$

где $S(f_0)$, $S(f_\infty)$ — спектральная плотность шума на частоте f_0 и f_∞ , которая выбрана из условия $\lambda_{\text{max}} \ll 2\pi f_0 \ll \alpha$; $2\pi f_\infty \gg \alpha$.

Учтем, что средний ток, проходящий через детектор I , и мощность реактора F находятся по формулам

$$I = \varepsilon q n_0 / l, \quad (3)$$

$$F = n_0 / \bar{v} l. \quad (4)$$

Тогда абсолютная мощность реактора в частотном методе определяется по соотношению

$$F = \frac{2}{\beta_{\text{эф}}^2} \chi \frac{I^2}{S(f_0) - S(f_\infty)},$$

где $\chi = (\bar{v}^2 - \bar{v}) / \bar{v}^2 = 0,795 \pm 0,007$ — параметр Дайвона для ^{235}U .

Данный метод в виде, предложенном Р. Шредером, оказался практически неприменим для быстрых реакторов, поскольку для них частота f_∞ составляет как минимум несколько килогерц. Поэтому плато частотной характеристики нейтронного детектора должно иметь протяженность до этих частот. Реальные детекторы имеют протяженность плато в лучшем случае до 2—3 кГц. По этой причине прямое измерение спектральной плотности мощности $S(f_\infty)$ становится некорректным, что является ограничивающим фактором. Для преодоления этих трудностей был предложен модифицированный частотный метод, сущность которого заключается в замене прямого измерения $S(f_\infty)$ регистрацией среднего тока камеры I и заряда q , так как из соотношений (2), (3) следует $S(f_\infty) = 2qI$. Тогда получаем выражение для абсолютной мощности реактора в следующем виде:

$$F = \frac{2}{\beta_{\text{эф}}^2} \chi \frac{I^2}{S(f_0) - 2qI}. \quad (4)$$

При этом эффективность детектора определяется соотношением

$$\varepsilon = \frac{S(0) - 2qI}{2qI} \frac{1}{\chi} \beta_{\text{эф}}^2. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (4) для определения абсолютной мощности реактора необходимо измерить ток ионизационной камеры и спектральную плотность мощности шумовой составляющей тока детектора на нулевых частотах $S(f_0)$.

Таким образом, модифицированный частотный метод отличается от просто частотного заменой прямого измерения величины $S(\infty)$ на косвенное. При этом необходимо знать величину q — заряд в детекторе на регистрацию нейтрона.

Одним из способов нахождения q является измерение тока нейтронного детектора и спектральной плотности мощности его шумовой составляющей в области низких частот. При этом детектор размещается на двух различных расстояниях от активной зоны реактора для обеспечения его различной эффективности. Пусть в положении 1 ток детектора составляет I_1 , спектральная плотность мощности — $S_1(f_0)$, в положении 2 — I_2 и $S_2(f_0)$, причем в общем случае абсолютная мощность реактора может быть

разной, например, F_1 и F_2 соответственно. Можно показать, что заряд q может быть получен по следующей формуле через измеряемые параметры:

$$q = \frac{(I_1/I_2)^2 F_2/F_1 S_2(f_0) - S_1(f_0)}{2I_1[(I_1/I_2) F_2/F_1 - 1]}.$$

Входящее в эту формулу отношение F_2/F_1 определяется по показаниям пультовых приборов, контролирующих относительный уровень мощности реактора.

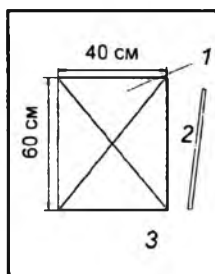
На тепловом реакторе МАТР-2 [3] (твэлы представляют собой диоксид урана обогащением 5% по ^{235}U) для градуировки штатного токового измерителя мощности ТИМ-2 была проведена серия измерений абсолютной мощности установки модифицированным частотным методом. В экспериментах использовали борную ионизационную камеру КНК-56. Как видно из рис. 2, детектор располагался в боковом водяном отражателе на расстоянии ~ 15 см от активной зоны реактора в сухой гильзе с некоторым наклоном к боковой поверхности реактора.

На рис. 3 показана блок-схема экспериментов. Сигнал от ионизационной камеры по кабелю подавался на прибор ИАМ-2М (измеритель абсолютной мощности), разработанный в ФЭИ. Принцип работы прибора заключается в следующем. Выходной сигнал ионизационной камеры подается на токовый усилитель. Далее усиленный сигнал поступает на одноканальный частотный анализатор. Резонансный фильтр анализатора выделяет гармонические составляющие шумового компонента сигнала ионизационной камеры с частотами, близкими к резонансной частоте фильтра (1,5 Гц). Затем измеряется спектральная плотность мощности ($S(f_0)$ в выражении (4)) отфильтрованного сигнала ионизационной камеры, точнее, его шумовой составляющей. Одновременно измеряется ток камеры. Затем измеренные значения подставляются в выражение (4), чтобы получить абсолютную мощность реактора в единицах дел./с. Используя соотношение $1 \text{ Вт} = 3 \cdot 10^{10}$ дел./с, можно найти мощность в ваттах.

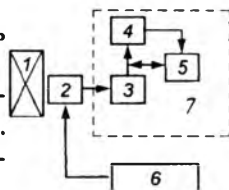
Измерения проводили на трех разных уровнях мощности. Расчеты абсолютной мощности по выражению (4) показаны в таблице. Здесь же приведена мощность реактора МАТР-2, измеренная штатной системой СУЗ.

Результаты определения абсолютной мощности реактора МАТР-2 модифицированным частотным методом

Абсолютная мощность		Показания токового измерителя мощности, 10^{-7} А
дел./с $\cdot 10^{11}$	Вт	
$1,16 \pm 0,09$	$3,73 \pm 0,29$	0,19
$2,1 \pm 0,2$	$6,77 \pm 0,64$	0,33
$18,0 \pm 0,08$	$58,15 \pm 2,63$	0,029



Р и с. 2. Схема расположения ионизационной камеры: 1 — активная зона; 2 — ионизационная камера КНК-56; 3 — вода



Р и с. 3. Блок-схема экспериментов: 1 — активная зона; 2 — ионизационная камера КНК-56; 3 — токовый усилитель; 4 — частотный анализатор; 5 — отсчетное устройство; 6 — высоковольтный источник питания; 7 — прибор ИАМ-2М

В экспериментах эффективность нейтронного детектора, определяемая по формуле (5), составила $4 \cdot 10^{-4}$.

Погрешность измерения абсолютной мощности реактора складывается из погрешностей оценок $\beta_{\text{эф}}$, параметра Дайвона ($\chi = 0,795 \pm 0,007$ для ^{235}U [4]), а также измеренных величин: тока ионизационной камеры, спектральной плотности мощности $S(f_0)$ и заряда в детекторе. Тогда относительную погрешность измерений мощности реактора можно оценить по соотношению

$$\frac{\Delta F}{F} = \sqrt{\left(\frac{2\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta(S(0) - 2qI)}{S(0) - 2qI}\right)^2 + \left(\frac{2\delta\beta_{эф}}{\beta_{эф}}\right)^2}.$$

Ошибка определения заряда в детекторе ($q = 0,76 \cdot 10^{-15}$) равна $\sim 10\%$. Однако она не вносит заметного вклада в суммарную погрешность, так как произведение $2qI$ было мало по сравнению с $S(f_0)$ (на всех уровнях мощности отношение $2qI/S(f_0)$ составляет менее 0,2 вследствие высокой эффективности нейтронного детектора). С учетом всех составляющих относительная погрешность определения абсолютной мощности составила 6—9%.

Полученные значения абсолютной мощности в пределах ошибок измерений согласуются с ходом показаний штатного токового измерителя мощности.

Время проведения каждого эксперимента занимает ~ 30 мин, обработка результатов измерений, т.е. получение абсолютной мощности — не более нескольких минут.

Следует отметить, что модифицированный частотный метод определения абсолютной мощности реактора является пассивным, т.е. не требует вмешательства в режим работы установки, а это является несомненным достоинством данной методики. Кроме того, он применим и к быстрым реакторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bennett E. The rice formulation of pile noise. — Nucl. Sci. Engng, 1960, v. 8, p. 53—56.
2. Schroder R. Bestimmung der Reactorleistung mit Hilfe der Reactorrauschens. — Nukleonik, 1967, Hf. 4, S. 227—229.
3. Могильнер А.И., Швецов Д.М., Морозов С.А. и др. Измерение абсолютной мощности реактора и эффективного выхода запаздывающих нейтронов. — Вопросы физики ядерных реакторов, 1968, вып. 1, с. 166—170.
4. Уриг Р. Статистические методы в физике ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.

Поступила в Редакцию 25.08.2000

УДК 661.879.94

РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ

*Царенко И.А., Серик В.Ф., Титов В.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Акишин В.С., Хохлов В.А. (Сибирский химический комбинат)*

Плутоний — наиболее химически активный металл актиноидной группы, который заметно корродирует на воздухе. В то же время он является высокотоксичным и дорогостоящим материалом. Поэтому переработка плутонийсодержащих материалов представляется актуальной с точки зрения как экономической, так и охраны окружающей среды.

Раньше внимание к этой проблеме объяснялось стремлением увеличить сроки сохранности металлического плутония [1]. Сегодня больший интерес представляет поиск возможных вариантов его использования, прежде всего способов перевода в удобную для дальнейшего передела химическую форму [2]. Это может быть растворение в минеральных кислотах, фторирование или хлорирование металла.

Самостоятельный научный и практический интерес представляет окисление металлического плутония и его сплавов с образованием реакционноспособных оксидов, пригодных для различных схем переработки.

Исследованию получения порошков оксидов из металлического плутония посвящена настоящая статья.