

исчисления к. п. д. имеет преимущества перед постоянным, применяемым в настоящее время. Интеграторами тепловой мощности реактора служат описанные выше пиллеры, а электрической мощности — счетчик вырабатываемой генератором энергии типа САЗУ-670Д. Работа измерителя к. п. д. понятна из выражения (5), описывающего способ измерения к. п. д., и рис. 3, иллюстрирующего реализацию этого способа.

Разработанные методы и аппаратура позволят автоматизировать наиболее трудоемкие расчетные операции,

повысить точность измерений, сократить численность групп, повысить экономичность установок за счет ведения режима по уточненной информации, оперативно получаемой от вычислительных устройств. Предложенные алгоритмы могут также использоваться в информационных и управляющих машинах для расчета расчетных параметров в настоящей работе обобщенных параметров.

Поступило в Редакцию 6/IX 1971 г.

К вопросу о сравнении высокопоточных исследовательских реакторов

В. А. ЦЫКАНОВ

УДК 621.039.572

В работе [1] приведены критерии, которые можно использовать для сравнения высокопоточных реакторов различного типа. Один из них можно назвать «идеальным к. п. д.» реактора. Он представляет собой долю полезно используемых нейтронов от всех рожденных в реакторе нейтронов:

$$\eta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n V_{\sigma i} \Sigma_{\sigma i} \bar{\Phi}_i}{7,5 \cdot 10^{16} Q}, \quad (1)$$

где $V_{\sigma i}$ — $\Sigma_{\sigma i}$, $\bar{\Phi}_i$ — соответственно экспериментальный объем, допустимое макроскопическое сечение поглощения нейтронов образцами и усредненный нейтронный поток для i -го экспериментального устройства реактора; Q — мощность реактора, $Mвт$; n — число экспериментальных устройств.

Так как расходы на облучение образцов зависят также от глубины выгорания ядерного горючего и коэффициента использования реактора во времени, то предлагается величину η_0 умножить на допустимое относительное выгорание горючего α и коэффициент использования реактора K_{II} ($K_{II} = \frac{t_p}{t_K}$, где t_p — время работы реактора на номинальной мощности в отрезок календарного времени t_K). Чем выше произведение $\eta_0 \alpha K_{II}$, тем лучше реактор.

Недостаток такого сравнения заключается в том, что все три величины в этом произведении взаимосвязаны и любая из них может изменяться за счет других. При этом неясно, каким образом следует изменять эти величины для улучшения свойств реактора. Следовательно, с помощью предложенного метода сравнения можно определить только, какой из реакторов с фиксированными значениями η_0 , α и K_{II} лучше. Однако этот метод не дает возможности установить, в каком направлении следует изменять эти величины, чтобы улучшить свойства реактора.

В настоящей работе предлагается более общий способ сравнения высокопоточных реакторов, позволяющий также определить целесообразное изменение входящих в критерий сравнения параметров реактора. Как и в работе [1], здесь нельзя рекомендовать единственный критерий для сравнения, так как всегда приходится рассматривать два вопроса: скорость получения информации об облученных образцах и экономичность этого процесса. Первый вопрос по-прежнему определяется производительностью исследовательского

реактора, которая может быть представлена в виде

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i \Sigma_{\sigma i} V_{\sigma i} \text{нейтр/сек}, \quad (2)$$

второй вопрос, ранее характеризовавшийся произведением $\eta_0 K_{II} \alpha$, может быть определен, исходя из стоимости полезно используемого нейтрона в том или ином реакторе. Действительно, более экономичным является тот реактор, в котором полезно используемый нейтрон дешевле.

В соответствии с работой [2] стоимость 1 ч работы исследовательского реактора при коэффициенте использования K_{II} определяется выражением

$$C = \frac{\Delta}{K_{II}} + \frac{gQ}{\alpha} C_{\Gamma}, \quad (3)$$

где Δ — полные эксплуатационные расходы реактора (кроме затрат на ядерное горючее), отнесенные к 1 ч календарного времени; C_{Γ} — цена 1 кг ядерного горючего в изделиях; g — расход ядерного горючего на 1 $Mвт \cdot ч$ тепловой энергии, $кг/Mвт \cdot ч$; Q выражена в мегаваттах. За 1 ч работы реактора полезно используется следующее количество нейтронов:

$$N = 3600\Pi = 3600 \sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i \Sigma_{\sigma i} V_{\sigma i}. \quad (4)$$

Следовательно, цена одного полезно используемого нейтрона равна

$$S = \frac{\Delta}{3600 K_{II} \sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i \Sigma_{\sigma i} V_{\sigma i}} + \frac{gQ C_{\Gamma}}{3600 \alpha \sum_{i=1}^n \bar{\Phi}_i \Sigma_{\sigma i} V_{\sigma i}}. \quad (5)$$

С учетом (1) равенство (5) можно переписать в виде

$$S = \frac{0,37 \cdot 10^{-20}}{\eta_0} \left[\frac{\Delta}{K_{II} Q} + \frac{g C_{\Gamma}}{\alpha} \right]. \quad (6)$$

Полученное соотношение полнее характеризует экономичность высокопоточного реактора и позволяет определять вклад физических характеристик реактора (через η_0 и α), а также постоянной и топливной составляющих стоимости эксплуатации.

Равенство (5) с учетом (2) принимает следующий вид:

$$S = \frac{2,78 \cdot 10^{-4}}{\Pi} \left[\frac{\Delta}{K_{II}} + \frac{gQ C_{\Gamma}}{\alpha} \right]. \quad (7)$$

Отсюда видно, что экономически более выгодными являются те высокопоточные реакторы, у которых выше производительность, ниже полные эксплуатационные расходы, ниже отношение Q/α и которые допускают эксплуатацию при высоких коэффициентах использования во времени.

Полученные соотношения позволяют провести некоторую оптимизацию характеристик исследовательских реакторов, если использовать эти соотношения не для сравнения действующих реакторов, а для определения более выгодных параметров их работы при проектировании. Покажем эту возможность на примере выбора оптимальной глубины выгорания горючего.

Из соотношения (7) видно, что топливная составляющая цены одного нейтрона

$$S_T \approx \frac{Q}{\Pi \alpha} \quad (8)$$

Здесь зависимостью величины g от свойств реактора можно пренебречь. Рассмотрим реактор ловушечного типа, аналогичный реактору СМ-2 [3, 4]. Поток нейтронов в ловушке (или ловушках) такого реактора в первом приближении пропорционален средней объемной тепловой нагрузке \bar{q}_V :

$$\bar{\Phi} \approx \bar{q}_V \approx \frac{Q}{V_p} \quad (9)$$

где V_p — объем активной зоны. Следовательно, при заданных свойствах и размерах экспериментальных устройств реактора его производительность

$$\Pi \approx \frac{Q}{V_p} \quad (10)$$

При заданном составе активной зоны запас реактивности на стационарное отравление и выгорание будет зависеть от избыточного (по сравнению с критическим) объема активной зоны. Для рабочих объемов активной зоны, не превышающих четырех-пяти критических объемов, с удовлетворительной точностью зависимость реактивности от объема представить в виде

$$\rho = A \ln \frac{V_p}{V_{кр}} \%, \quad (11)$$

а потери реактивности на выгорание

$$\Delta \rho_{\text{выг}} = \frac{B}{V_p} \% / \text{Мет} \cdot \text{ч}, \quad (12)$$

где $V_{кр}$ — критический объем активной зоны; A , B — константы, зависящие от свойств реактора. Реактивность, расходуемая на выгорание,

$$\rho_{\text{выг}} = \rho - \rho_{\text{отр}} = A \ln \frac{V_p}{V_{\text{отр}}} \quad (13)$$

где $\rho_{\text{отр}}$ — потери реактивности на стационарное отравление реактора; $V_{\text{отр}}$ — объем активной зоны, запас реактивности в которой равен реактивности, необходимой на компенсацию стационарного отравления.

После этого легко получить выражение для выгорания:

$$\alpha \frac{Ag}{Bg_0} \ln \frac{V_p}{V_{\text{отр}}}, \quad (14)$$

где g_0 — концентрация ядерного горючего в твэлах реактора.

Подставив (10) и (14) в (8), получим

$$S_T \approx \frac{V_p}{\ln V_p / V_{\text{отр}}} \quad (15)$$

Анализируя выражение (15), легко показать, что величина S_T минимальна при $\ln \frac{V_p}{V_{\text{отр}}} = 1$. Следовательно, оптимальное относительное выгорание

$$\alpha_{\text{опт}} = \frac{Ag}{Bg_0} \quad (16)$$

Например, для реактора СМ-2 (для которого $A = 14\%$; $B = 57 \cdot 10^{-4} \% \cdot \text{Мет} \cdot \text{ч}$; $g = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / \text{Мет} \cdot \text{ч}$; $g_0 = 0,55 \text{ кг} / \text{л}$) оптимальное выгорание $\alpha \approx 0,23$, что близко к результатам, полученным в работе [5].

Необходимо отметить, что для более точного определения оптимального выгорания следует минимизировать полную цену используемых нейтронов, хотя учет постоянной составляющей стоимости обычно увеличивает оптимальное выгорание всего на несколько процентов.

Поступило в Редакцию 27/XII 1971 г.
В окончательной редакции 24/II 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Цыканов «Атомная энергия», 31, 15 (1971).
2. В. А. Цыканов. «Атомная энергия», 14, 469 (1963).
3. С. М. Фейнберг и др. (СССР) III Женевская конференция (1964), доклад № 320.
4. В. А. Цыканов и др. Kernenergie, 9, Н. 10, 310 (1966).
5. А. С. Коченов. «Атомная энергия», 21, 97 (1966).

Сорбция борной кислоты на анионитах из растворов, имитирующих контурные воды атомных реакторов, и условия ее десорбции

УДК 621.039.7

Ф. В. РАУЗЕН, Е. А. ШАХОВ

Изучению сорбции борсодержащих ионов анионитами посвящено несколько работ [1—5]. Установлено, что сорбируемые борат-ионы вытесняются с анионита анионами сильных кислот [4].

Количество сорбированной борной кислоты растет с увеличением ее концентрации в исходном растворе. Этот рост объясняется тем, что с увеличением концентрации борной кислоты сорбция ее на анионитах про-