

Серия точных измерений показала, что длина диффузии  $L = 0,520 \pm 0,002$  м.

То обстоятельство, что функции  $\rho_i(r)$  и  $b_i(r)$  могут различаться только постоянным коэффициентом, позволяет определить возраст нейтронов  $\tau_{0i}$  путем сопоставления этих кривых при условии, что в точке сопоставления спектральной чувствительности  $r_0$   $\rho_i(r_0) \equiv b_i(r_0)$ . Они должны совпадать во всех точках  $r$ , если для расчета использовались правильные значения  $\tau_{0i}$  и  $L$ .

Так как зависимость  $\rho = \rho(r, \tau_0, L)$  невозможно выразить через элементарные функции с коэффициентом  $\tau_0$ , то возраст определялся методом подбора так, чтобы дисперсия полученного уравнения была минимальной.

Найденные экспериментально и путем расчета концентрации тепловых нейтронов в области изменения  $r = 0,3 \div 0,6$  м, т. е. там, где функция  $\rho(r, \tau_0, L)$  наиболее чувствительна к изменению  $\tau_0$ , для нейтронов из реакции  $T(d, n) He^4$  совпадают в пределах  $(0,2 \div 0,4)\%$ .

При определении возраста предложенным способом погрешность  $\delta\tau_0$  зависит от погрешностей экспериментально определяемых величин  $N(r) \approx \rho(r)$  и  $L$ .

Если предположить, что дисперсия  $D(L) = 0$ , то для определения дисперсии  $D(\tau_0)$  следует воспользоваться зависимостью  $\rho(r) = f(\tau_0) |_{L=\text{const}}$ . Тогда получим  $D(\rho) = (tg \alpha)^2 D(\tau_0)$  (рис. 3). Среднее значение  $1/tg \alpha \approx 2 \cdot 10^8$ , а среднеквадратичная погрешность  $S(\rho) \leq 1 \cdot 10^{-8}$ . Кроме того, можно принять, что  $\delta\rho = k\delta\tau_0 |_{L=\text{const}} = k\delta L |_{\tau_0=\text{const}}$ , т. е.  $\delta\tau_0 = \delta L$  при  $D_L(\rho) = 0$ . Таким образом, максимальная погрешность определения возраста равна  $\delta\tau_0 = \delta\rho + \delta L = 0,8\%$ .

В таблице приведены результаты измерения  $L = \sqrt{V\tau_0}$  в графите с длиной диффузии, равной 0,520 м, для нейтронов, испускаемых различными источниками; средние энергии взяты из работ [3—5].

Нетрудно видеть, что возрасты нейтронов из реакции  $T(d, n) He^4$ , определенные импульсным методом [6] (погрешность  $\sim 2\%$ ) и методом, примененным в настоящей работе (погрешность 0,8%), совпадают, что свидетельствует об отсутствии заметных систематических ошибок в этих измерениях.

На рис. 3 приведена зависимость  $\ln E_i = f(\tau_{0i})$ , которая в области  $2 Mэв < E_i < 5 Mэв$  в соответствии с теорией Маршака может быть представлена в виде прямой. Если предположить, что средние энергии нейтронов Po — В-, Ra — Ве- и Pu — Ве-источников определены правильно, то средняя энергия нейтронов Ac — Ве-источника, измеренная методом ядер отдачи, завышена; она должна быть принята равной 4,1 Мэв. Аналогичный вывод сделан в работе [7], где определялась доля нейтронов с энергией менее 1 Мэв в спектре Ac — Ве-источника.

Поступило в Редакцию 10/XI 1971 г.  
В окончательной редакции 19/I 1973 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Т. Щеболева. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 89 (149), 133 (1967).
2. P. Wallace. Nucleonics, 4, No. 2 (1949).
3. I. De Paolger. J. Nucl. Instrum. and Methods, 5, 61 (1959).
4. K. Yeiger, J. Jarvis. Canad. J. Phys., 40, 33 (1962).
5. O. Rinnals, R. Boucher. Canad. J. Phys., 34, 949 (1956).
6. З. Длоуглы. «Атомная энергия», 9, 182 (1960).
7. Б. Н. Крылов, В. И. Фоминых. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 124 (184), 198 (1970).

## К методике сопоставления различных схем АЭС

Г. П. ВЕРХИВКЕР

Сопоставление различных вариантов тепловых схем АЭС значительно сложнее, чем сопоставление различных схем ТЭС, работающих на органическом топливе. Действительно, изменение к. п. д. при постоянной электрической мощности приводит к изменению тепловой мощности, а следовательно, капиталовложений в реактор и топливной составляющей, определяющейся не только тепловыми, но и нейтронно-физическими расчетами. Для упрощения сопоставления вариантов следует принять тепловую мощность реактора постоянной. Тогда стоимость реактора и топливная составляющая остаются неизменными для всех вариантов (в пределах одного типа реактора), изменение электрической мощности компенсируется выдчей электроэнергии от замещающей станции, которая работает на топливе, замыкающем энергобаланс данного экономического района.

Это положение особенно справедливо для реакторов-размножителей, когда выработка электроэнергии совмещается с задачей наработки вторичного горючего, пропорциональной нейтронному потоку, а следовательно, и тепловой мощности. В связи с тем что наработка вторичного горючего чрезвычайно важна для развития ядерной энергетики, представляется, что

тепловая мощность реакторов-размножителей должна быть выбрана максимально возможной для данного типа, а АЭС должны работать в базисной части графика нагрузок [1]. При такой постановке оказывается неправильным распространенное мнение о том, что для АЭС с быстрыми реакторами, когда топливная составляющая мала, к. п. д. установки не имеет большого значения. Изменение к. п. д. будет приводить не к уменьшению количества ядерного горючего, потребляемого данной АЭС, а к экономии замыкающего топлива, являющегося, как известно, наиболее дорогим для данного экономического района.

Для вывода аналитических соотношений, определяющих эффективность тех или иных изменений в схеме АЭС, используем понятие «базовый вариант», предложенный Ю. Д. Арсеньевым [2]. Обозначим к. п. д. этого варианта  $\eta^*$  и капиталовложения  $K^*$ , к. п. д. и стоимость любого другого сопоставляемого варианта АЭС соответственно  $\eta_i$  и

$$K_i = K^* + \Delta, \quad (1)$$

где  $\Delta$  — дополнительные капиталовложения в установку по сравнению с базовым вариантом, величина  $\Delta$  может быть и отрицательной.

УДК 621.039.553.34

Суммарные капиталовложения в энергетическую систему для варианта, сопоставляемого с базовым, находятся из выражения

$$K_{\Sigma} = K_i + Q_T (\eta^* - \eta_i) K_{\text{зам}} \quad (2)$$

Стоимость топлива, сожженного на замещающей станции в течение года, определяется следующим образом:

$$C_T = \frac{Q_T (\eta^* - \eta_i) \tau}{\eta_{\text{зам}} Q_P^H} c_T \quad (3)$$

$K_{\text{зам}}$  — удельные капиталовложения в замещающую мощность;  $Q_T$  — тепловая мощность АЭС;  $\eta_{\text{зам}}$  — к. п. д. замещающей станции;  $C_T$  — стоимость 1 т замыкающего топлива;  $Q_P^H$  — теплотворная способность этого топлива;  $\tau$  — число часов использования установленной мощности за год. Зная капиталовложения в сопоставляемые варианты и стоимость сожженного топлива, нетрудно определить расчетные затраты при каждом варианте.

Для определения экономической эффективности того или иного изменения установки по отношению к базовому варианту используем понятие замыкающих затрат на электроэнергию. Тогда переменная часть расчетных затрат данного варианта определится как

$$Z_{\text{пер}, i} = p K_i + a_{\text{АЭС}} K_i + Z_{\text{перс}, i}^{\text{АЭС}} + Q_T (\eta^* - \eta_i) \tau \varphi_{\text{зам}}^{\circ} \quad (4)$$

а переменная часть расчетных затрат базового варианта

$$Z_{\text{пер}}^* = p K^* + a_{\text{АЭС}} K^* + Z_{\text{перс}}^{\text{АЭС}} \quad (5)$$

Здесь  $\varphi_{\text{зам}}^{\circ}$  — замыкающие затраты на электроэнергию;  $p$  — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений;  $a_{\text{АЭС}}$  — суммарная норма амортизационных отчислений, расходов на текущий ремонт и прочих расходов для АЭС;  $Z_{\text{перс}}^{\text{АЭС}}$  и  $Z_{\text{перс}, i}^{\text{АЭС}}$  — годовая заработная плата персонала АЭС для базового и текущего вариантов соответственно, определяемая по штатному коэффициенту АЭС ( $\Pi_{\text{АЭС}}^{\circ}$ ), средней годовой заработной плате одного работника АЭС ( $z_{\text{з.п}}^{\text{АЭС}}$ ) и установленной мощности АЭС  $Q_T \eta^*$  и  $Q_T \eta_i$ .

Данный вариант будет иметь такой же экономический эффект, что и базовый, при условии

$$Z_{\text{пер}, i} = Z_{\text{пер}}^* \quad (6)$$

Приняв  $Z_{\text{перс}}^{\text{АЭС}} = Z_{\text{перс}, i}^{\text{АЭС}}$ , после несложных преобразований выражения (6) получим

$$\Delta = \frac{Q_T (\eta_i - \eta^*) \varphi_{\text{зам}}^{\circ} \tau}{p + a_{\text{АЭС}}} \quad (7)$$

Изменения в установке будут экономически целесообразны, если при  $\eta_i > \eta^*$  дополнительные затраты не превысят величины  $\Delta$  или если при  $\eta_i < \eta^*$  уменьшение капиталовложений по абсолютной величине будет больше  $\Delta$ , определяемого из выражения (7).

Экономическая эффективность данного изменения схемы составит

$$\vartheta = \frac{Z_{\text{пер}}^* - Z_{\text{пер}, i}}{Z_{\text{пер}}^*} \cdot 100\% \quad (8a)$$

или

$$\vartheta = \frac{Q_T (\eta_i - \eta^*) \tau \cdot \varphi_{\text{зам}}^* - \Delta (p - a_{\text{АЭС}})}{Z^*} \cdot 100\% \quad (8)$$

где  $Z^*$  — суммарные расчетные затраты в базисный вариант схемы.

При более точных расчетах следует учитывать продолжительность строительства и наладки станции или блока до ввода в нормальную эксплуатацию. Тогда выражение (8) примет несколько более развернутый вид. Так, например, предположим, что первый блок АЭС должен быть построен за два года. В первый год вкладывается  $n_1$  стоимости строительства, а во второй год  $n_2$ , тогда в третий год (год наладки) число часов использования установленной мощности составляет  $\tau_3$ , в четвертый год (нормальная эксплуатация) —  $\tau_4$ . Используем общую формулу определения расчетных затрат:

$$Z = p \sum_{t=1}^{T_c} \frac{K_t}{(1 + p_{\text{пр}})^{t-1}} + \frac{U_{\text{н}}}{(1 + p_{\text{пр}})^{t-1}} \text{ руб/год},$$

где  $p$  и  $p_{\text{пр}}$  — нормативный коэффициент эффективности и коэффициент приведения затрат во времени соответственно (в дальнейшем примем  $p = p_{\text{пр}} = 0,12$ );  $T_c$  — период строительства;  $K_t$  — капитальные вложения в год  $t$ , руб/год;  $t$  — год осуществления затрат с начала строительства;  $U_{\text{н}}$  — эксплуатационные расходы в год нормальной эксплуатации. Тогда экономический эффект (приведенный к году начала строительства) от дополнительных капиталовложений  $\Delta$ , изменяющих к. п. д. АЭС с  $\eta^*$  до  $\eta_i$ , составит

$$\vartheta = \frac{100}{Z^*} \left\{ Q_T (\eta_i - \eta^*) \varphi_{\text{зам}}^{\circ} \left[ \frac{\tau_3}{(1+p)^2} + \frac{\tau_4}{(1+p)^3} \right] - \Delta \left[ p \left( n_1 + \frac{n_2}{1+p} \right) + a_{\text{АЭС}} \left( \frac{1}{(1+p)^2} + \frac{1}{(1+p)^3} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

Выражения (7) — (9) позволяют определить целесообразность тех или иных изменений в тепловой части схемы (введение дополнительных подогревателей, изменение температурных напоров и пр.) без проведения полных проектных проработок АЭС. При этом необходимо оценить только изменение капиталовложений  $\Delta$  и к. п. д. установки, что обычно нетрудно сделать.

В качестве примера предположим, что тепловая мощность реактора составляет 2500 Мвт;  $\eta^* = 0,35$ ;  $Z^* = 68$  млн. руб.;  $\tau = 7000$  ч/год;  $a_{\text{АЭС}} = 0,0966$ ;

$\Delta = 0,2$  млн. руб.;  $\eta_i = 0,351$ ;  $\varphi_{\text{зам}}^{\circ} = 1,2$  коп/квт.ч.

Тогда экономический эффект, определенный по выражению (8), составит приблизительно 1%. Однако повышение капиталовложений при том же изменении к. п. д. до 3,2 млн. руб. дает уже нулевую экономию расчетных затрат. Следует отметить, что использование предлагаемой методики возможно только в том случае, когда изменения в установке не приводят к изменению затрат на ядерное горючее и коэффициент воспроизводства и допустимы по предельным ограничивающим параметрам.

Таким образом, изменение к. п. д. АЭС в связи с работой их в базисной части графика нагрузки при-

водит к изменению затрат в замещающую мощность и на замыкающее топливо. В связи с этим задача повышения к. п. д. АЭС не менее важна, чем задача повышения к. п. д. ТЭС. Предлагаемая методика позволяет весьма просто оценивать целесообразность тех или иных изменений схемы и оборудования данного типа АЭС по отношению к базовому варианту.

Поступило в Редакцию 10/VII 1972 г.

## К вопросу о стоимости облучения в исследовательском реакторе

А. С. КОЧЕНОВ, П. ГИЦЕСКУ

Большая мощность современных исследовательских реакторов приводит к значительному расходу ядерного горючего. Этим и объясняется то внимание, которое уделяется оптимизации параметров исследовательских реакторов [1—5]. В работе [4] введено понятие «продукция исследовательского реактора», которое определено как количество полезно поглощенных избыточных (по отношению к цепной реакции) нейтронов. В работе [5] введен «к. п. д. исследовательского реактора» — доля полезно поглощенных нейтронов.

Естественно, чем больше используется избыточных нейтронов, тем ниже стоимость исследований. Однако при определении стоимости облучения образцов необходимо учитывать не только количественную сторону (число поглощенных нейтронов), но и качественную (уровень потока нейтронов, уровень фонового излучения и пр.).

В некоторых реакторах потоки тепловых нейтронов в экспериментальных каналах отличаются друг от друга более чем на порядок. Если в этом случае определять топливную составляющую стоимости используемых нейтронов только в соответствии с количеством поглощенных нейтронов, то стоимость облучения образцов в экспериментальном канале с большим потоком может быть в несколько раз меньше за счет завышения стоимости облучения в каналах с низким потоком.

Нетрудно убедиться в том, что стоимость используемых нейтронов зависит от величины потока. В качестве примера рассмотрим поток тепловых нейтронов в активной зоне.

Пусть в реакторе в отсутствие экспериментальных образцов средняя глубина выгорания выгружаемого горючего составляет  $B_0$ , коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде  $k_0$  и средний поток тепловых нейтронов в активной зоне при мощности  $Q_0$  равен  $\Phi_0$  ( $\Phi$  — соответственно средний поток нейтронов при наличии образца). При загрузке экспериментальных образцов в активную зону реактивность, как правило, уменьшается. Чтобы поддержать критичность, можно либо уменьшить глубину выгорания, оставив прежним объем активной зоны, или, наоборот, увеличить объем активной зоны без изменения глубины выгорания (можно, конечно, одновременно менять оба параметра). Рассмотрим случай, когда при загрузке образцов изменяется только критический объем (мощность реактора поддерживается постоянной).

Производительность реактора по избыточным нейтронам в единицу времени равна

$$R_0 = \frac{k_0 - 1}{k_0} \cdot \frac{Q_0}{E_f} \nu_f, \quad (1)$$

где  $\nu_f$  — число вторичных нейтронов на деление;  $E_f$  — энергия на деление.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Доллежалъ, Ю. И. Корякин. Некоторые вопросы работы АЭС в энергосистемах. «Атомная энергия», 25, 387 (1968).
2. Ю. Д. Арсеньев. Теория подобия в инженерных экономических расчетах. М., «Высшая школа», 1971.

УДК 621.039.5.55

Однако при проведении экспериментов используется только часть избыточных нейтронов, равная  $\varepsilon R_0$  (здесь  $\varepsilon = \frac{R_0 - R}{R_0} = 1 - \frac{k-1}{k_0-1} \cdot \frac{k_0}{k}$ ;  $R$  и  $k$  — соответствующие параметры при наличии в активной зоне образцов).

Известно, что затраты на горючее  $g_0$  пропорциональны мощности и обратно пропорциональны глубине выгорания:

$$g_0 \sim \frac{Q_0}{B_0}, \quad (2)$$

отсюда топливная составляющая стоимости нейтронов  $c_T$  (в высокопоточных реакторах она является основной), отнесенная к одному использованному нейтрону, определяется выражением

$$c_T \sim \frac{g_0}{\varepsilon R_0} \sim \frac{1}{B_0} \cdot \frac{k_0}{k_0-1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{k-1}{k_0-1} \cdot \frac{k_0}{k}}. \quad (3)$$

Если влияние экспериментальных образцов на длину миграции нейтронов пренебрежимо мало и эффективная добавка намного меньше радиуса активной зоны, то

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \left( \frac{k-1}{k_0-1} \right)^{3/2}. \quad (4)$$

