

подается сигнал на погружение РР-1. Если период разгона ≤ 8 сек, периодомер 18 подает сигнал остановки реактора.

Таким образом, мощность реактора увеличивается с регулируемым периодом до заданной величины, после чего срабатывает нуль-орган 19, который закрывает ключ 34 и выключает блоки электронного 16 и электромашиного 8 усиления контура автоматического регулятора.

Нуль-орган (рис. 4) представляет собой усилитель постоянного тока с очень высокими входными сопротивлением и коэффициентом усиления [5]. Выход усилителя связан со входом триггера Шмидта, который служит для дальнейшего увеличения крутизны. Во втором плече триггера включено реле, которое замыкает цепь АР при достижении заданной мощности и отключает входную цепь нуль-органа. Время, требуемое для пуска, зависит от конкретного реактора и наложенного ограничения. При периоде 30 сек на реакторе в Аншасе потребовалось менее 10 мин от момента нажатия кнопки до достижения полной мощности.

Чтобы предохранить пусковые ионизационные камеры (ИК) от повреждения при высоких мощностях (100 кет и больше), периодомер 18 подает сигнал на последовательное извлечение трех пусковых ИК (24—26).

Для изменения мощности оператор должен привести АР в среднее положение, разомкнуть контур управления и поставить на задатчике нужную мощность. После этого дается разрешение на движение РР-1 и РР-2 в нужном направлении в соответствии с изменением мощности и под контролем периодометров 17 и 18. Когда мощность достигает требуемой величины, срабатывает нуль-орган, замыкает контур регулирования и запрещает движение РР-1 и РР-2.

Настоящая работа проводится при частичной поддержке Международного агентства по атомной энергии.

Поступила в Редакцию 22/XI 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. M o n t a. J. Nucl. Sci. and Technology, No. 6, 227 (1966); No. 2, 51 (1967).
2. S. M o o n, R. M o h l e r. Nucl. Sci. and Engng, 36, 125 (1969).
3. M. H a s s a n, M. A z e r, M. A. R. G h o n a i m y. A computer evaluation of reactor start-up algorithms. Proceeding of the International Seminar on Application of On-line Computers to Nuclear Reactors. Sandfjord, Norway (Sept. 1968). Paris, Publications De L'OCDE.
4. Л. С. Понтрягин и др. Математическая теория оптимальных процессов. М., «Наука», 1969.
5. М. А. Хасан, Ф. А. Гриневич. «Приборы и техника эксперимента», № 3, 137 (1969).

О критериях сравнения исследовательских реакторов

В. А. ЦЫКАНОВ

УДК 621.039.55

Разнообразие исследовательских реакторов и их характеристик в каждом конкретном случае выдвигает на первый план одни параметры и делает несущественными другие. Для получения в реакторе высоких значений нейтронного потока используются различные физические принципы. Например, в реакторе СМ-2 [1—3] и некоторых других реакторах высокий поток тепловых нейтронов образуется в замедляющей полости (нейтронной ловушке), расположенной в центре активной зоны. В большинстве реакторов максимальный поток тепловых нейтронов создается в большой активной зоне с очень низкой концентрацией ядерного горючего и высоким энерговыделением, приходящимся на единицу веса горючего. Реактором такого типа с наибольшим нейтронным потоком является тяжеловодный реактор в Саванна-Ривере (США) [4].

Даже если оставить в стороне такие существенные факторы, как приспособленность реактора для экспериментов, простота обслуживания его устройств и т. п., то из-за перечисленных выше причин проблема сравнения исследовательских реакторов остается достаточно сложной. Тем не менее сравнения полезны при выборе типа реактора и определении его основных характеристик. Следовательно, необходимы критерии для сравнения.

В работе [5] введено понятие «качества» исследовательского реактора, которое равно отношению величины максимального потока нейтронов в нем к тепловой мощности. Эта характеристика полезна при проведении оценок по выбору материалов отражателя и активной зоны, при сравнении однотипных реакторов одного и того же назначения. В работе [6], например, на основе понятия качества обоснованы

вается выбор материалов отражателя и замедлителя реактора для вывода нейтронных пучков.

Но это отношение не может являться параметром для сравнения различных исследовательских реакторов, так как оно далеко не полно их характеризует. Например, реактор с двумя одинаковыми нейтронными ловушками (а следовательно, и одинаковыми максимальными значениями потоков тепловых нейтронов в них) обладает за счет большей мощности меньшим качеством по сравнению с таким же реактором с одной нейтронной ловушкой. Однако в первом реакторе будет облучаться в два раза больше материалов, а его мощность, капитальные и эксплуатационные расходы меньше суммарных значений соответствующих величин двух реакторов с одной нейтронной ловушкой. Следовательно, для сравнения реакторов необходимо учитывать их экспериментальный объем.

Качество реактора можно поднять за счет уменьшения объема активной зоны. Однако при этом может уменьшиться выгорание и увеличатся эксплуатационные затраты за счет роста топливной составляющей и уменьшения коэффициента использования реактора, так как возрастет относительная доля времени, требующегося на перегрузки реактора. Таким образом, критерий для сравнения должен учитывать и это обстоятельство.

В большинстве случаев исследовательские реакторы используются для облучения материалов, образцы которых помещаются в экспериментальные устройства реакторов. Это происходит при проведении материаловедческих исследований, получении трансурановых элементов и других радиоактивных изотопов. Поэтому для достаточно широкого класса исследовательских реакторов производительность можно характеризовать числом поглощенных образцами нейтронов. С этой позиции возможно подойти к установлению критерия для сравнения реакторов.

Определим суммарное эффективное сечение поглощения облучаемых образцов как произведение макроскопического сечения поглощения $(\Sigma_a)_{обр}$ на объем, занятый образцами $V_{обр}$. Если реактор обладает n экспериментальными устройствами, то для получения общего сечения поглощения всеми образцами $(\sigma_a)_{обр}$ необходимо эти произведения суммировать по всем устройствам:

$$(\sigma_a)_{обр} = \sum_{i=1}^n (\Sigma_{ai} V_i)_{обр} \text{ см}^2. \quad (1)$$

Число поглощаемых образцами нейтронов в единицу времени равно

$$N = \sum_{i=1}^n \Phi'_i (\Sigma_{ai} V_i)_{обр} \text{ нейтр/сек.} \quad (2)$$

Этим выражением трудно пользоваться без предварительных исследований влияния загрузки образцов на величину нейтронного потока в канале Φ'_i . Обычно чем выше поглощательная способность загружаемых образцов, тем сильнее уменьшается нейтронный поток в канале по сравнению с исходным. Однако конкретный характер этой зависимости определяется свойствами реактора и облучаемого материала и заранее неизвестен. Поэтому для сравнения необходимо пользоваться более определенными характеристиками, зависящими только от свойств реактора. Можно утверждать, что величина нейтронного потока в экспериментальном канале не будет сильно отличаться от исходной, если в канал загружаются образцы, поглощение нейтронов в которых не отличается от поглощения нейтронов в окружающей среде. Например, если в реакторе типа реактора в Саванна-Ривере экспериментальный канал ставится вместо одного из рабочих каналов и в него загружаются образцы, поглощение нейтронов в которых не превышает поглощения в горячем рабочем канале, то можно принять такую же величину нейтронного потока, как в рабочем канале*, а число загружаемых образцов определяется из равенства поглощения нейтронов в горячем и образцах.

В реакторе ловушечного типа макроскопическое сечение образцов, отнесенных к объему ловушки, не должно превышать макроскопического сечения поглощения материала ловушки, хотя их объем должен быть значительно меньше объема ловушки, чтобы не было падения нейтронного потока из-за вытеснения замедлителя образцами.

Для любого экспериментального канала в отражателе реактора можно принять величину нейтронного потока в месте расположения этого канала такой, которая была бы при отсутствии канала, при условии, что поглощение

* Строго говоря, при равенстве поглощения нейтронов в горячем и образцах и при отсутствии генерации быстрых нейтронов в образцах величина нейтронного потока уменьшается по сравнению с исходной на долю вклада в поток тепловых нейтронов от замедления быстрых нейтронов, рождающихся в заменяемом канале. При расположении каналов по треугольной решетке это уменьшение не превышает 15%.

в образцах не будет превышать поглощения в соответствующем объеме материала отражателя.

Во всех этих случаях в выражении (2) величины Φ'_i могут быть заменены значениями соответствующих невозмущенных нейтронных потоков Φ_i , величины $(\Sigma_{ai})_{обр}$ — величинами Σ_{ai} материалов реактора в объеме экспериментального канала, а величины $(V_i)_{обр}$ — значениями объема экспериментального канала $(V_i)_{эксперим}$, т. е.

$$N = \sum_{i=1}^n \Phi_i \Sigma_{ai} (V_i)_{эксперим} \text{ нейтр/сек.} \quad (3)$$

Следует отметить, что обычно характер изменения нейтронного потока Φ_i при помещении образцов в канале таков, что в случае не очень существенного отличия $(\Sigma_{ai})_{обр}$ от Σ_{ai} произведение $\Phi_i \Sigma_{ai}$ остается постоянным. Поэтому вышеприведенная замена справедлива и тогда, когда поглощательная способность образцов отличается от принятого значения. С другой стороны, этот прием позволяет воспользоваться выражением (3), так как входящие в него величины легко определяются путем расчетов или эксперимента и зависят только от свойств реактора.

Выражение (3) характеризует общую производительность исследовательского реактора, но не его экономичность*.

Если правую часть равенства (3) разделить на тепловую мощность реактора Q (вт), то полученная величина является числом поглощенных в образцах нейтронов, отнесенных к 1 вт·сек выделенной в реакторе энергии:

$$\eta' = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_i \Sigma_{ai} (V_i)_{эксперим}}{Q} \text{ нейтр/вт·сек.} \quad (4)$$

Так как при выделении энергии, равной 1 вт × сек, рождается $\sim 7,5 \cdot 10^{10}$ быстрых нейтронов, то уравнение (4) можно переписать в виде, характеризующем долю полезно поглощенных (образцами) нейтронов:

$$\eta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_i \Sigma_{ai} (V_i)_{эксперим}}{7,5 \cdot 10^{10} Q} \quad (5)$$

Уравнение (5) может рассматриваться как выражение для к. п. д. исследовательского реак-

* Аналогичный подход к определению производительности исследовательского реактора проведен в работе [7] для случая облучения небольших образцов, слабо возмущающих нейтронный поток.

тора, предназначенного для облучения материалов. Сравнение таких реакторов между собой можно проводить, применяя выражения (3) и (5): первое характеризует производительность реактора без учета его экономических характеристик, второе — с учетом. Для более полного учета экономических характеристик реактора необходимо вместо величины η_0 пользоваться величиной

$$\eta = \eta_0 \alpha K_{исп}, \quad (6)$$

где α — относительная глубина выгорания в твэлах, извлекаемых из реактора; $K_{исп}$ — коэффициент использования реактора во времени ($K_{исп} = \frac{t_p}{t_R}$, где t_p — время работы реактора на номинальной мощности; t_R — календарное время). Смысл уравнения (6) легко понять: величина η_0 может быть высокой, но если реактор работает с малым выгоранием или плохо используется во времени, то его экономические показатели снижаются.

При уменьшении глубины выгорания вырастают затраты на горючее и время простоя, необходимое на перегрузки реактора (снижается $K_{исп}$). В работе [6] показано, что если в исследовательском реакторе поддерживать постоянный требуемый нейтронный поток, то глубина выгорания имеет оптимальное значение $\alpha_{опт}$. В этом случае в выражении (6) максимальное значение α должно равняться $\alpha_{опт}$.

Понижение величины $K_{исп}$ приводит к снижению производительности реактора и уменьшению его экономичности, поскольку при остановке реактора из всех эксплуатационных расходов равна нулю только топливная составляющая.

Поступила в Редакцию 23/IV 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Фейнберг и др. «Атомная энергия», 8, 493 (1960).
2. С. М. Фейнберг и др. Доклад № 320, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
3. В. А. Цыканов и др. Kernenergie, 9, Н. 10, 310 (1966).
4. Nucl. News, № 6, 19 (1965).
5. С. М. Фейнберг и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 334.
6. А. С. Коченов. «Атомная энергия», 21, 97 (1966).
7. А. Н. Ерыкалов, Ю. В. Петров. «Атомная энергия», 25, 52 (1968).

