

Максимизация $K_{эф}$ в гетерогенном реакторе перераспределением горючего в твэлах

АРТЮХОВ Г. Я., ИСТОМИНА И. В., МАКАРЕНКОВ Ю. Д., НЕВИНИЦА А. И., ПУШКО В. Я., РАСКАЧ Ф. П., САТИНА Е. П.

УДК 621.039.51

К настоящему времени опубликовано значительное число работ по оптимизации критических параметров гомогенных реакторов [1—8]. В работах [3, 4] рассмотрена задача достижения максимума эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{эф}$ в гомогенном реакторе с произвольным спектром нейтронов путем перераспределения горючего при постоянной его загрузке. В этих работах в рамках классической вариационной теории получен практически важный результат: для достижения максимального $K_{эф}$ необходимо выровнять функцию эффективности, которая учитывает изменение плотности ядер как горючего, так и других материалов реактора. В работе [5] описана методика расчетов максимального значения $K_{эф}$ и приведены результаты расчетов гомогенных уран-графитовых реакторов с различным спектром нейтронов.

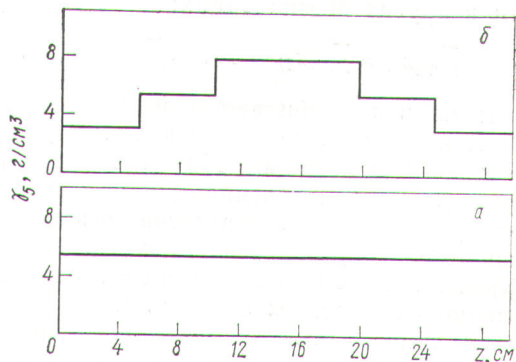
В настоящей статье представлены основные результаты расчетов и экспериментов, полученные при решении аналогичной задачи применительно к гетерогенному реактору с водяным замедлителем. Исследования выполнены на реакторе без торцовых отражателей, высота реактора 29,8 см. Диаметр активной зоны составлял 28 см, толщина бокового бериллиевого отражателя 8 см. Твэлы скомплектованы из блоков двуокиси высокообогащенного урана, помещенных в стальные трубы диаметром 1,1 см. В экспериментах использовались блочки с тремя значениями плотности горючего. Распределение плотности горючего вдоль твэлов в исследованных сборках приведено на рис. 1. Для получения различных плотностей горючего применялась специальная технология спекания двуокиси урана без введения каких-либо добавителей.

Твэлы размещены в воде равномерно по концентрическим окружностям, площади элементарных ячеек одинаковы. В исходном варианте реактора (сборка № 1) с постоянной плотностью горючего в твэлах ядерные плотности основных компонентов активной зоны, таких, как ^{235}U , вода, железо, равны соответственно: $\rho_{\text{U}} = 0,00112 \cdot 10^{24}$ ядер/см³; $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0293 \cdot 10^{24}$ ядер/см³; $\rho_{\text{Fe}} = 0,00110 \cdot 10^{24}$ ядер/см³.

При исследованиях решалась следующая задача. Для имеющегося комплекта блочков

из двуокиси урана необходимо получить наибольшее значение $K_{эф}$ в гетерогенном реакторе, перераспределив горючее так, чтобы сохранить количество горючего в каждом твэле и число твэлов. При этом распределение других материалов в реакторе не изменялось. При решении задачи использовалось понятие функции эффективности горючего (ФЭГ) [3, 4], которая показывает, насколько изменяется $K_{эф}$ реактора при помещении одного ядра горючего в заданную точку. Заметим, что величина ФЭГ варьируемого материала (в рассматриваемом случае двуокиси урана) учитывает также изменение влияния и остальных материалов реактора вследствие возмущений пространственно-энергетических распределений потоков и ценности нейтронов. Оптимальное распределение плотности горючего, соответствующее максимуму $K_{эф}$, можно получить перераспределением горючего в соответствии с изменением ФЭГ по объему реактора. В однородном реакторе без отражателя ФЭГ монотонно падает от центра активной зоны к ее периферии, поэтому для увеличения $K_{эф}$ значения плотности горючего в твэлах распределяются так же: уменьшаются от центра к периферии.

С учетом понятия ФЭГ поставленную задачу можно математически сформулировать и решить следующим образом. Оптимизация осуществляется соответствующим размещением вдоль твэлов реактора с высотой активной зоны H блочков горючего с фиксированными ядер-



Р и с. 1. Распределение плотности горючего в твэлах: а — сборка № 1; б — сборка № 2.

ными плотностями $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k$, которые образуют k зон. Границы зон обозначим абсциссами $z_0, z_1, z_2, \dots, z_k$. С учетом симметрии задачи начало координат выберем в середине высоты реактора ($z_0 = 0, z_k = \frac{H}{2}$). По сравнению с исходной (постоянной по высоте) плотностью ρ_0 перераспределение горючего в твэле приводит к изменению $K_{эф}$ на величину

$$\Delta K_{эф}(z_1, z_2, \dots, z_{k-1}) = 2S \sum_{i=1}^k \int_{\rho_0}^{\rho_i} \int_{z_{i-1}}^{z_i} f[\rho(z), z] d\rho dz \quad (1)$$

при постоянной загрузке горючего

$$2S \sum_{i=1}^k (\rho_i - \rho_0) (z_i - z_{i-1}) = 0, \quad (2)$$

где S — поперечное сечение блочков горючего; $f[\rho(z), z]$ — ФЭГ в точке z при ядерной плотности горючего $\rho(z)$. Задача сводится к нахождению оптимальных значений z_1, z_2, \dots, z_{k-1} , соответствующих максимуму $\Delta K_{эф}$ при условии (2). Такая задача является типичной вариационной задачей на условный экстремум [9]. Необходимое условие оптимального распределения размеров зон можно представить в таком виде:

$$\frac{\int_{\rho_1}^{\rho_2} f[\rho(z), z_1] d\rho}{\rho_2 - \rho_1} = \frac{\int_{\rho_2}^{\rho_3} f[\rho(z), z_2] d\rho}{\rho_3 - \rho_2} = \dots = \frac{\int_{\rho_{k-1}}^{\rho_k} f[\rho(z), z_{k-1}] d\rho}{\rho_k - \rho_{k-1}} \quad (3)$$

или в других обозначениях:

$$\bar{f}_{12}(z_1) = \bar{f}_{23}(z_2) = \dots = \bar{f}_{(k-1)k}(z_{k-1}). \quad (4)$$

Размеры зон подбираются итерационным способом в соответствии с условиями (4) и (2). За исходную функцию эффективности принята $f(\rho_0, z)$. При полученном распределении зон непосредственно из расчетов реактора (или экспериментов) определяется ход функции эффективности, в соответствии с которым вновь уточняются размеры зон и т. д.

В проведенных экспериментах использовались бочки горючего с тремя плотностями: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$, причем $\rho_2 = \frac{\rho_1 + \rho_3}{2}$. В этом случае

условия (4) и (2) принимают вид

$$\bar{f}_{12}(z_1) = \bar{f}_{23}(z_2); \quad (5)$$

$$z_2 = \frac{H}{2} - z_1, \quad (6)$$

где (6) означает равенство размеров зон с минимальной и максимальной плотностями горючего.

Экспериментальные исследования проведены в такой последовательности. Из блочков с плотностью горючего ρ_2 собрана сборка № 1. Для этой сборки измерено и рассчитано распределение ФЭГ, с использованием которой в первом приближении найдены оптимальные размеры зон с тремя значениями плотности горючего. Затем в соответствии с полученными данными комплектовались твэлы для сборки № 2. По данным измерений на сборке № 2 предполагалось определить распределение горючего в последующем приближении. Однако эти итерации не понадобились.

Для экспериментального определения ФЭГ на выбранном участке твэла последовательно помещались бочки с различными плотностями горючего (в том числе и с «нулевой плотностью»), затем по изменению положения регулятора реактивности определяли соответствующее изменение $K_{эф}$ (рис. 2, кривая 1). Дифференцируя кривую 1, получали значения ФЭГ для различной плотности урана (см. рис. 2, кривую 2). Значения ФЭГ усреднены по объему, в котором заменяются бочки. Быстрое снижение вели-

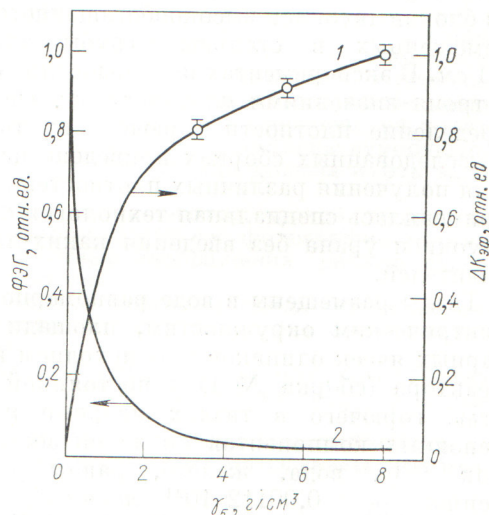
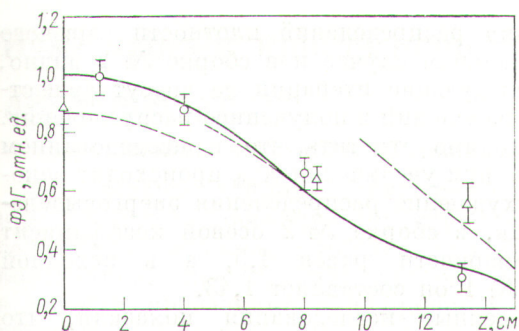


Рис. 2. Зависимость $\Delta K_{эф}$ и ФЭГ от плотности горючего.



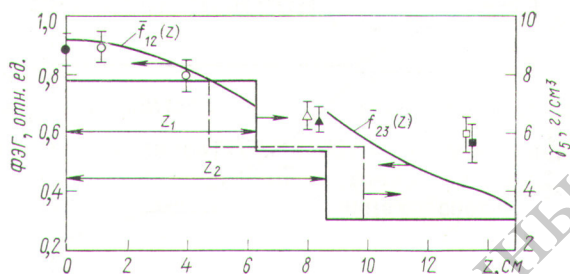
Р и с. 3. Распределение ФЭГ по высоте реактора ($z = 0$ — середина высоты).

Сборка № 1: — расчет; ○ — эксперимент.
Сборка № 2: - - - - - расчет; △ — эксперимент.

чины ФЭГ при увеличении плотности горючего до ~ 2 г/см³ (на всех рисунках указана плотность по ²³⁵U) вызвано возрастанием гетерогенной самоэкранировки урана в блочках для тепловых нейтронов; при плотностях больше 3 г/см³ блокоч можно считать практически «черным» для этих нейтронов. Дальнейшее изменение ФЭГ происходит в основном за счет изменения блокировки замедляющихся нейтронов.

На основании результатов измерений на различных участках твэла и с разными твэлами получена зависимость ФЭГ по высоте (рис. 3) и радиусу реактора. Эксперименты на сборке № 1 показали, что распределения ФЭГ по объему реактора для различных плотностей горючего (в диапазоне 3,2—8,0 г/см³) имеют одинаковую форму в пределах ошибок измерений (10%). Это означает, что оптимальное распределение плотностей горючего для всех твэлов сборки должно быть одинаковым.

В исследованном реакторе условия (5), (6) соответствуют максимальному значению $K_{эф}$. Графический способ определения размеров зон для первой итерации (сборка № 2) показан на рис. 4. Значения $\bar{f}_{12}(z)$ и $\bar{f}_{23}(z)$ получены с использованием кривой 2 рис. 1 и сплошной кривой рис. 3 усреднением ФЭГ в диапазонах соответственно от средней плотности до максимальной и от средней плотности до минимальной. На рис. 4 показаны участки кривых $\bar{f}_{12}(z)$ и $\bar{f}_{23}(z)$. Там же сплошной линией изображена гистограмма оптимального распределения трех плотностей горючего, а пунктиром — ближайшее к нему распределение, которое можно получить с имеющимся набором блокоч (сборка № 2). Измерения в сборке № 2 и соот-



Р и с. 4. Определение оптимального распределения трех плотностей горючего по высоте реактора:

○, △, □ — значения $f(\rho)$ для сборки № 1 для трех плотностей ²³⁵U (7,9; 5,5 и 3,24 г/см³); ●, ▲, ■ — то же для сборки № 2.

ветствующие расчеты показали, что при увеличении $K_{эф}$ ФЭГ выравнивается (см. рис. 3). Разрывы расчетной пунктирной кривой на границах зон с различной плотностью горючего связаны с условной гомогенизацией этих зон в гетерогенном реакторе. Экспериментальные значения ФЭГ для трех плотностей горючего в пределах ошибок измерений не изменились по сравнению со сборкой № 1 (см. рис. 4). Это объясняется сравнительно слабым изменением спектра нейтронов по высоте сборки № 2, так как плотность замедлителя не варьировалась, а все три типа блокоч урана являлись практически «черными» для тепловых нейтронов.

Оценка влияния на оптимальное распределение горючего некоторого изменения пространственной зависимости ФЭГ при переходе от сборки № 1 к сборке № 2 (см. рис. 3) показала, что размер центральной зоны увеличивается, приближаясь к размеру этой зоны в сборке № 2. Таким образом, необходимость в следующей итерации по подбору размеров зон отпадает, так как на сборке № 2 получено максимальное значение $K_{эф}$ для имевшегося комплекта блокоч при сохранении исходной загрузки.

В экспериментах установлено, что в сборке № 2 по сравнению с № 1 значение $K_{эф}$ возросло на $(1,25 \pm 0,08)\%$. Для непрерывного изменения плотности горючего увеличение $K_{эф}$ будет еще больше. Совокупность результатов измерений ФЭГ на сборках № 1 и № 2 позволила оценить максимальный выигрыш в $K_{эф}$ при непрерывном оптимальном распределении плотности горючего. В этом случае при итерационном перераспределении горючего в соответствии с изменением ФЭГ в центре реактора

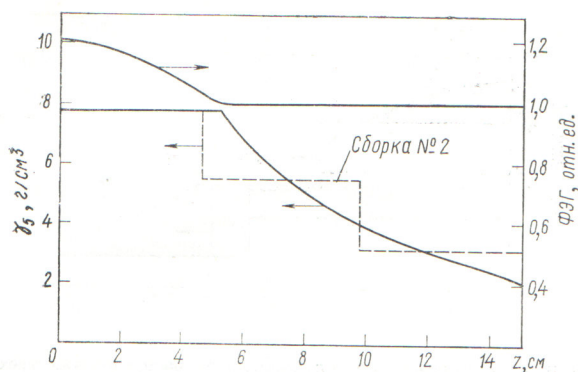


Рис. 5. Оптимальное непрерывное распределение ^{235}U по высоте реактора и соответствующее распределение ФЭГ (для сравнения показано распределение ^{235}U в сборке № 2).

может образоваться зона с максимальновозможной плотностью горючего; в остальной области горючее будет перераспределяться до тех пор, пока не получится полное выравнивание ФЭГ. Следует отметить, что в частном случае, когда плотность горючего при оптимизации не достигает граничных значений, для получения максимального $K_{эф}$ необходимо выравнивать ФЭГ по всему объему активной зоны [3, 4]. С помощью графиков, представленных на рис. 2 и 3, было найдено оптимальное распределение горючего при непрерывном изменении плотности (рис. 5). Задача облегчалась в связи с возможностью использования ФЭГ в виде произведения $\bar{f}(\rho, z) = \varphi(\rho)\psi(z)$. Выигрыш в $K_{эф}$ для сборки № 2 по сравнению со сборкой № 1, определенный с использованием графиков рис. 2 и 3, должен составить 1,5%. Из рис. 5 видно, что в сборке № 2 распределение плотности горючего близко к оптимальному. Поэтому для этих двухборок различие в выигрыше $K_{эф}$ по отношению к исходной сборке № 1 невелико (1,25 и 1,5%). Из

сравнения распределений плотности горючего в оптимальном случае и в сборке № 2 видно, что последующие итерации не внесут существенных изменений в полученное распределение.

Необходимо отметить, что в исследованном реакторе при увеличении $K_{эф}$ происходит некоторое ухудшение распределения энерговыделения. Так, в сборке № 2 осевой коэффициент неравномерности равен 1,5, а в исходной сборке № 1 он составляет 1,43.

Проведенные исследования показали, что использование понятия функции эффективности при экспериментах на реакторах практически удобно и позволяет целенаправленно осуществлять поиск оптимального распределения материалов в реакторе.

В заключение авторы благодарят В. И. Кузьмина, В. Е. Левина за участие в обсуждении результатов работы, а также А. Н. Покровского, А. И. Бережняка, Ф. И. Наумовца и А. С. Каленкова за помощь при проведении экспериментов.

Поступила в Редакцию 13/VIII 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goetzl G. J. Nucl. Energy, 1956, v. 2, p. 193.
2. Callihan A. e.a. I Женевская конф. 1955, докл. США № 834.
3. Пупко В. Я., Дружинина Г. И. Препринт ФЭИ-644. Обнинск, 1964.
4. Абагян А. А. и др. III Женевская конф. 1964, докл. СССР P/364.
5. Пупко В. Я., Кузьмин В. И. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 3, с. 231.
6. Хромов В. В. и др. В сб.: «Физика ядерных реакторов». М., Атомиздат, 1970, вып. 2, с. 3.
7. Рудик А. П. Ядерные реакторы и принцип максимума Понтрягина. М., Атомиздат, 1971.
8. Goldschmidt P. Nucl. Sci. and Engng, 1972, v. 49, p. 263.
9. Лаврентьев М. А., Люстерник Л. А. Курс вариационного исчисления. М., Гостехтеориздат, 1950.