

4. Дж. Киппин. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1967.
5. Pulsed Neutron Research. V. II Vienna, IAEA, 1965, p. 3.
6. С. Б. Шихов, А. А. Шкурпелов. Препринт НИИАР П-22, 1968.
7. J. Mika. Nukleonik, 9, 46 (1967).
8. Г. И. Марчук, В. В. Орлов. В сб. «Нейтронная физика». М., Атомиздат, 1961, стр. 30.
9. Физика промежуточных реакторов. М., Госатомиздат, 1961.

10. C. Masters, K. Cady. Nucl. Sci. and Engng, 29, 272 (1967).
11. D. Bach et al. Nucl. Sci. and Engng, 11, 199 (1961).
12. Э. А. Стумбур и др. «Атомная энергия», 27, 215 (1969).
13. A. Waltar, L. Ruby. Nukleonik, 8, 287 (1967); 10, 70 (1967).
14. C. Preskitt et al. Nucl. Sci. and Engng, 29, 283 (1967).
15. R. Tuttle. Nucl. Sci. and Engng, 21, 451 (1965).

Определение запаса реактивности методом двойной перекомпенсации

Т. С. Дидейкин, Б. П. Шипин

УДК 621.039.51

Измерение больших надкритичностей ядерного реактора связано со значительными трудностями. Характерными в этом отношении являются опыты по определению запаса реактивности реактора путем измерения дифференциальной реактивности [1, 2].

В настоящей работе предлагается способ определения запаса реактивности на основе измерения реактивности в подкритическом реакторе.

Известно, что реактивность размножающей системы ρ является функцией всех физических параметров, влияющих на размножающие свойства реактора [2, 3], т. е. $\rho = \rho(x, y, \dots, z)$.

Пусть надкритическая система с набором параметров $x_0, y_0, \dots, z_0$ характеризуется реактивностью

$$\rho(x_0, y_0, \dots, z_0) > 0. \quad (1)$$

Положительную реактивность можно скомпенсировать изменением одного из параметров, например x_0 , до значения x_1 , оставив остальные параметры неизменными. Реактивность такой критической системы

$$\rho(x_1, y_0, \dots, z_0) = 0. \quad (2)$$

Аналогичным образом первоначальную надкритическую систему можно привести в критическое состояние изменением другого параметра — y .

Тогда

$$\rho(x_0, y_1, \dots, z_0) = 0. \quad (3)$$

Если в реакторе одновременно изменить параметры x_0 на x_1 и y_0 на y_1 , оставив остальные без изменения, то такой реактор станет подкритическим:

$$\rho(x_1, y_1, \dots, z_0) < 0. \quad (4)$$

Между реактивностями (1) и (4) существует строгая связь. Установим эту связь, воспользовавшись разложением $\rho(x, y, \dots, z)$ в ряд Тейлора по степеням $(x - x_0)$ и $(y - y_0)$:

$$\begin{aligned} \rho(x, y, \dots, z) = & \rho(x_0, y_0, \dots, z_0) + (x - x_0) \frac{\partial \rho}{\partial x} + \\ & + (y - y_0) \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{(x - x_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{(y - y_0)^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \\ & + 2 \frac{(x - x_0)(y - y_0)}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \rho}{\partial x \partial y} + \dots + R_n. \end{aligned} \quad (5)$$

Возможность такого разложения устанавливается на основании анализа остаточного члена R_n , который

должен стремиться к нулю при возрастании числа членов в разложении (5) [4]. Рассмотрим выражение (5) при $x = x_1, y = y_1$. В левой части этого выражения стоит реактивность дважды перекомпенсированного реактора, в правой части — первый член представляет собой реактивность надкритического реактора, а остальные слагаемые — соответствующие поправочные члены, которые можно найти в рамках любой математической модели реактора, зная зависимость реактивности от параметров $x, y, \dots, z$.

Таким образом, выражение (5) позволяет находить надкритичность системы (запас реактивности) на основе подкритических измерений реактивности. Отрицательная реактивность может быть измерена любым доступным в конкретных условиях способом: импульсным методом, методом анализа шумов и т. п. При этом необходимо оценить поправочные члены. Покажем, что для «голого» реактора в одногрупповом диффузионном приближении запас реактивности по абсолютной величине точно равен величине $1 - K_{\text{эфф}}$ подкритического реактора при перекомпенсации реактора путем введения дополнительного поглотителя нейтронов и изменения геометрического параметра, а при перекомпенсации путем одновременного изменения двух геометрических параметров реактора, например радиуса и высоты активной зоны, равен реактивности подкритического реактора.

Запишем реактивность «голого» цилиндрического реактора в виде

$$\rho = 1 - \frac{\Sigma_c (1 + \kappa_R^2 M^2 + \kappa_H^2 M^2)}{v \Sigma_f}, \quad (6)$$

где Σ_c, Σ_f — макроскопические сечения поглощения и деления; v — выход нейтронов на одно деление; κ_R^2, κ_H^2 — радиальный и высотный геометрические параметры; M^2 — квадрат длины миграции нейтронов.

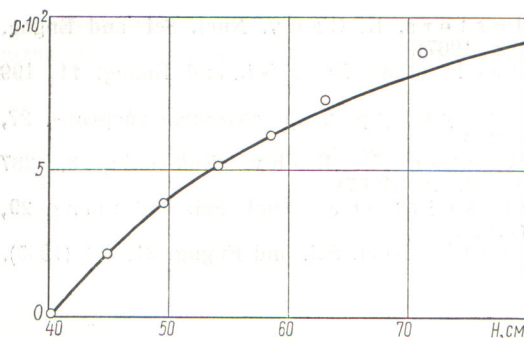
При перекомпенсации путем введения дополнительного поглотителя и изменения геометрических размеров реактора реактивность записывается так:

$$\rho(x, y, \dots, z) = 1 - \frac{x(1+y)}{v \Sigma_f}, \quad (7)$$

где $x = \Sigma_c$; $y = \kappa_R^2 M^2 + \kappa_H^2 M^2$.

При перекомпенсации путем изменения радиуса и высоты реактивность

$$\rho(x, y, \dots, z) = 1 - \frac{\Sigma_c (1 + x + y)}{v \Sigma_f}, \quad (8)$$



Запас реактивности реактора ρ в зависимости от уровня воды H в нем:

— получено интегрированием измеренной дифференциальной реактивности; $\circ$ — импульсные измерения реактивности в подкритическом реакторе. Относительная ценность запаздывающих нейтронов рассчитана.

где

$$x = \kappa_R^2 M^2; \quad y = \kappa_H^2 M^2.$$

Подставляя выражения (7) и (8) в (5), после несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} & \rho(x_1, y_1, \dots, z_0) = \\ & = \rho(x_0, y_0, \dots, z_0) \frac{1}{1 - \rho(x_0, y_0, \dots, z_0)} = \\ & = K_{\text{эфф}}(x_0, y_0, \dots, z_0) - 1, \end{aligned} \quad (9)$$

где $K_{\text{эфф}}$ — эффективный коэффициент размножения нейтронов;

во втором случае реактивность системы равна подкритичности реактора, взятой с обратным знаком:

$$-\rho(x_1, y_1, \dots, z_0) = \rho(x_0, y_0, \dots, z_0). \quad (10)$$

С целью проверки полученных результатов было проведено экспериментальное определение запаса реактивности реактора по измерению дифференциальной реактивности при изменении уровня воды в реакторе, а также путем определения подкритичности импульсным методом при двойной перекомпенсации за счет внесения дополнительного поглотителя в виде раствора борной кислоты и уменьшения высоты активной зоны. Измерения проводились на уран-водной критической сборке, для которой отношение ядер водорода к ядрам U^{235} составляло около 80.

Для лучшего приближения к модели «голого» реактора сборка снизу и сбоку была покрыта листовым кадмием толщиной 1 мм.

На рисунке представлены данные экспериментального определения запаса реактивности реактора при различном уровне воды в реакторе. Результаты измерений указанными двумя методами находятся в удовлетворительном согласии.

В заключение отметим, что параметры двойной перекомпенсации следует выбирать из соображений практического удобства. Единственное ограничение, накладываемое на такие параметры, состоит в том, что изменение каждого параметра в отдельности должно привести систему в критическое состояние.

Поступило в Редакцию 13/X 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ненгу. Nucl. Sci. and Engng, 3, 52 (1958).
2. Т. М. Дидейкин, Б. П. Шилин. «Атомная энергия», 22, 113 (1967).
3. Т. С. Дидейкин, Б. П. Шилин. «Атомная энергия», 24, 380 (1968).
4. И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. Справочник по математике. М., Гостехиздат, 1954.

Эффект Доплера и ядерная безопасность быстрого реактора

Г. В. УСЫНИН, Л. Н. ПОЛЯНИН

УДК 621.039.526:621.039.516

Наличие отрицательного эффекта Доплера в быстром реакторе, связанного с температурной зависимостью сечения взаимодействия нейтронов с ядрами горючего, оказывает компенсирующее влияние на внезапные изменения реактивности, обусловленные, например, закипанием натрия в активной зоне. При отсутствии достаточно быстродействующей обратной связи между возникающим повышением мощности и реактивностью это приводит к неконтролируемому разгону реактора.

Рассмотрим два момента, характеризующих действие эффекта Доплера при возмущениях реактивности, а именно: оценим время запаздывания этого эффекта относительно изменения плотности нейтронов и рассмотрим влияние гетерогенности топливной композиции на его величину.

Изменение реактивности вследствие изменения температуры топливной композиции приближенно может быть описано выражением

$$T^\alpha \frac{d\rho}{dT} = \text{const}, \quad (1)$$

где α — некоторая постоянная. В широком диапазоне температур $\alpha \approx 1$.

Представим локальную температуру горючего в виде суммы:

$$T(r, t) = T_0 + \theta(r, t), \quad (2)$$

где T_0 — невозмущенное значение температуры. Тогда изменение реактивности вследствие повышения температуры горючего в точке r в момент времени t будет равно

$$\begin{aligned} \delta\rho(r, t) &= \text{const} \int_{T_0}^{T_0+\theta} \frac{dT}{T^\alpha} = \\ &= \begin{cases} \frac{\text{const } T_0^{1-\alpha}}{1-\alpha} \left[\left(1 + \frac{\theta}{T_0}\right)^{1-\alpha} - 1 \right], & \alpha \neq 1; \\ \text{const} \ln \left(1 + \frac{\theta}{T_0}\right), & \alpha = 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Допустим, что в реакторе произошло скачкообразное повышение плотности нейтронов, вызывающее повышение плотности делений. Принимая в качестве $\theta(r, t)$ распределение температуры от точечного мгновенного