

СТАТЬИ

УДК 621.039.5

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДКРИТИЧНОСТИ РЕАКТОРА ПО ПОКАЗАНИЯМ ДАТЧИКОВ

Дегтярев А.М. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

При контроле подкритичности остановленного реактора по нейтронному потоку на внутризонных датчиках возникает вопрос об информативности этих показаний в условиях локальных возмущений размножающей способности реактора. Имеется в виду ситуация, когда фиксированным показаниям датчиков вне связи с их собственными характеристиками может отвечать спектр состояний реактора с различной размножающей способностью, вследствие чего суждение об уровне подкритичности становится неопределенным. В настоящей работе исследуются основные факторы, обуславливающие данное явление в плане их влияния на погрешность определения подкритичности.

Поясним механизм «слепоты» датчиков на простейшей одномерной модели. Пусть имеется бесконечный по высоте цилиндрический реактор с условиями отражения на боковой поверхности, в центре которого расположен датчик. Примем, что диффузионные характеристики реактора и имеющегося в нем источника нейтронов постоянны по радиусу, локальная размножающая способность может варьировать вблизи некоторого постоянного уровня. Рассмотрим, каким может быть диапазон неопределенности $K_{эф}$ в таком реакторе при неизменности показаний датчика.

Для постоянной по радиусу размножающей способности нейтронный поток в одностационарном диффузионном приближении с использованием общепринятых обозначений описывается уравнением

$$D_0 \Delta \Phi_0 + (v \Sigma_f)_0 \Phi_0 - \Sigma_{a0} \Phi_0 + Q_0 = 0 \quad (1)$$

или в операторном виде

$$L_0 \Phi_0 + Q_0 = 0. \quad (2)$$

Решение Φ_0 уравнений (1), (2) есть постоянная величина. При локальном возмущении размножающих свойств оператор L_0 в уравнении должен быть заменен на $L_0 + L$, где L — возмущение, поток Φ_0 — на $\Phi_0 + \Phi$. Тогда уравнение (2) примет вид $(L_0 + L)(\Phi_0 + \Phi) + Q_0 = 0$, из которого, пренебрегая членом второго порядка малости $L\Phi$, получим $L_0 \Phi = -L\Phi_0$.

Воспользовавшись теорией возмущений [1] и сопряженным уравнением ценности нейтронов в невозмущенном реакторе $L_0^+ \Phi^+ = -\delta(r)$, находим изменение нейтронного потока на датчике в реакторе с возмущенными свойствами:

$$\int_S \Phi \delta(r) dS = \Phi(0) = \int_S \Phi^+ L \Phi_0 dS = (\Phi^+, L \Phi_0), \quad (3)$$

где r — радиальная координата; S — сечение реактора.

Так как в одnogрупповом приближении $L_0^+ = L_0$, то Φ^+ есть решение уравнения

$$D_0 \Delta \Phi^+ + (v \Sigma_f)_0 \Phi^+ - \Sigma_{a0} \Phi^+ + \delta(r) = 0 \quad (4)$$

и, таким образом, совпадает с функцией распределения нейтронного потока, порождаемого δ -источником в центре реактора.

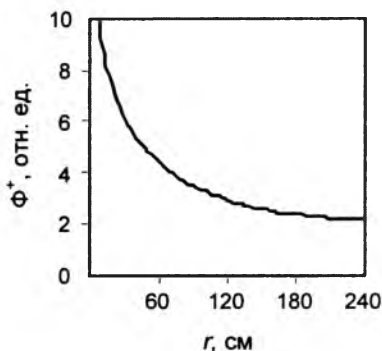
Решением уравнения (4) с точностью до нормировочного множителя A является

$$\Phi^+(r) = A [I_0(xr) + \frac{I_1(xR)}{K_1(xR)} K_0(xr)], \quad (5)$$

где

$$x^2 = ((v \Sigma_f / \Sigma_a)_0 - 1) / (D / \Sigma_a)_0 = (K_{\infty,0} - 1) / M_0^2 \quad (6)$$

— материальный параметр; R — радиус реактора. Φ^+ представляет собой монотонно убывающую функцию с бесконечным значением в точке 0, скорость спада которой быстро уменьшается с увеличением r (рис. 1). При уменьшении подкритичности ($|x^2| \rightarrow 0$) кривая становится более полой.



Р и с. 1. Пример $\Phi^+(r)$ ($R = 240$ см, $x^2 = -3,4 \cdot 10^{-5}$ см⁻²)

Согласно поведению $\Phi^+(r)$ влияние локальных возмущений на поток в центре реактора уменьшается с удалением от центра. Как следствие возмущение размножающей способности в двух тонких кольцевых слоях равной площади, таких, что $L_1 \Phi_0 / L_2 \Phi_0 = -\Phi^+(r_2) / \Phi^+(r_1)$, согласно формуле (3) не повлияет на поток в центре реактора. В то же время $K_{эф}$ реактора изменится, так как $L_1 \Phi_0$ и $L_2 \Phi_0$ различны по модулю, а фрагменты активной зоны, как вытекает из сделанных предположений о свойствах невозмущенного реактора, равноценны с точки

зрения воздействия на $K_{эф}$. Таким образом, показания датчика не изменятся, хотя им в действительности будет отвечать уже другая подкритичность.

Рассмотрим вопрос с консервативных позиций, именно в какой ситуации отклонение $K_{эф}$ от реперного невозмущенного состояния может быть наибольшим. Для одинакового по реактору коридора локальных возмущений $K_\infty [-\Delta K_\infty, \Delta K_\infty]$ возмущение $K_{эф}$ при постоянных показаниях датчика будет максимальным, когда активная зона разделена на два кольцевых слоя с экстремальными противоположными по знаку возмущениями реактивности в каждом из этих слоев. Ограничимся анализом только такой консервативной ситуации, которая оправдывает использование азимутально-независимого решения. Граница раздела слоев r_1 находится из условия постоянства нейтронного потока в центре

$$\int_0^{r_1} \Phi^+(r) r dr - \int_{r_1}^R \Phi^+(r) r dr = 0.$$

Отсюда с учетом выражения (5) получаем уравнение

$$2\alpha r_1[I_1(\alpha r_1)K_1(\alpha R) - I_1(\alpha R)K_1(\alpha r_1)] + I_1(\alpha R) = 0, \quad (7)$$

из которого следует, что αr_1 есть функция αR . При этом изменение $K_{\infty\Phi}$ по отношению к первоначальному невозмущенному состоянию составляет согласно теории возмущений [1, 2]

$$\frac{\delta K_{\infty\Phi}}{K_{\infty\Phi}} = \pm \frac{r_1^2 - (R^2 - r_1^2)}{R^2} \left(\frac{\Delta K_{\infty}}{K_{\infty}} \right) = \pm \left(2 \left(\frac{r_1}{R} \right)^2 - 1 \right) \frac{\Delta K_{\infty}}{K_{\infty}}, \quad (8)$$

где знак «+» в правой части отвечает положительному и отрицательному возмущениям размножающей способности во внутреннем и внешнем слое соответственно, знак «-» — противоположной ситуации. Формула (8) получена в условиях принятых допущений о свойствах реактора и вносимых возмущениях. С учетом отмеченного свойства решения уравнения (7) относительное возмущение $K_{\infty\Phi}$ представимо в виде

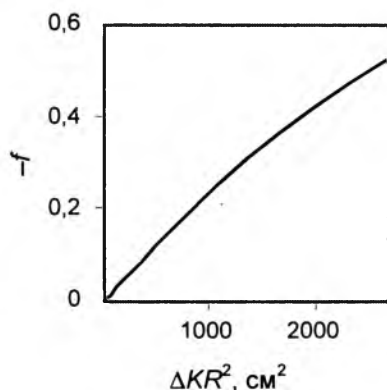
$$\frac{\delta K_{\infty\Phi}}{K_{\infty\Phi}} = \pm g(\alpha R) \frac{\Delta K_{\infty}}{K_{\infty}}$$

или (см. выражение (6)) при $M^2 = \text{const}$

$$\frac{\delta K_{\infty\Phi}}{K_{\infty\Phi}} = \pm f(\Delta KR^2) \frac{\Delta K_{\infty}}{K_{\infty}}, \quad (9)$$

где g, f — некоторые функции; $\Delta K = 1 - K_{\infty\Phi}$ — подкритичность невозмущенного реактора, в нашем случае также равная $1 - K_{\infty}$. Таким образом, реакторы с равными αR (или ΔKR^2 при равных M^2) и одинаковым диапазоном возможных возмущений $K_{\infty} [-\Delta K_{\infty}, \Delta K_{\infty}]$ с точностью до слабоменяющегося параметра K_{∞} эквивалентны в отношении $\delta K_{\infty\Phi}/K_{\infty\Phi}$.

По определению (см. уравнения (8), (9)) функция f отрицательна, т.е. если возмущение размножающей способности положительно во внутреннем слое и отрицательно во внешнем, то изменение $K_{\infty\Phi}$ отрицательно. С увеличением аргумента абсолютная величина f , значит, и чувствительность $K_{\infty\Phi}$ к возможным возмущениям ΔK_{∞} возрастает (рис. 2). Это понятно, так как с ростом R при постоянном ΔK увеличивается контролируемая датчиком область, если же, наоборот, при постоянном R возрастает ΔK , то спад $\Phi^+(r)$ (см. рис. 1) становится более крутым, что создает возможность для больших возмущений $K_{\infty\Phi}$ при неизменном потоке в центре. При уменьшении ΔKR^2 график $\Phi^+(r)$ вырождается в прямую, параллельную оси r , сближаясь с постоянной весовой функцией Φ_0^2 , используемой при расчете $\delta K_{\infty\Phi}$. В такой ситуации изменение $K_{\infty\Phi}$ без изменения потока в центре реактора становится невозможным и поток в центре реактора как индикатор подкритичности



Р и с. 2. Зависимость $-f$ от ΔKR^2 при $M^2 = 460 \text{ см}^2$

становится более представительным. Характер зависимости $\delta K_{эф}$ от подкритичности приводит к невозможности ошибочного прогноза подкритичности реактора в то время, как он в действительности уже находится в надкритическом состоянии. По сути данное свойство очевидно, так как в основе анализа лежит предположение о стационарности реактора, что несовместимо с его надкритичностью. Согласно поведению f при $\Delta KR^2 \approx 400 \text{ см}^2$, например, если $R = 200 \text{ см}$, $\Delta K = 0,01$, на каждый процент неопределенности локальной размножающей способности возможный диапазон изменения $K_{эф}$, не регистрируемый датчиком, составляет около 0,1%, при $\Delta KR^2 \approx 1600 \text{ см}^2$ его значение достигает уже 0,3%.

Перейдем к рассмотрению вопроса на более адекватной двумерной модели цилиндрического реактора. Уравнения переноса нейтронов в исходном и возмущенном состояниях аналогичны рассмотренным и отличаются только двумерной структурой операторов L_0 и L . Из решения задачи (1) с источником находили поток Φ_0 в невозмущенном реакторе, из соответствующей условно-критической задачи — подкритичность и поток $\Phi_{кр}$. Как и в одномерном случае, для расчета возмущений нейтронного потока в месте расположения датчиков используются решения сопряженного уравнения типа (4). Указанные задачи решаются на основе представления искомых функций потока и ценности ортогональным рядом вида

$$J_m(x_{m,k}r)[a_{m,k}\cos(m\varphi) + b_{m,k}\sin(m\varphi)], \quad (10)$$

где φ — угловая координата. Изменение нейтронного потока в месте расположения датчиков $\delta\Phi_i = (\Phi_i^+, L\Phi_0)$ представляется в квадратурной форме

$$\delta\Phi_i = \sum_j (\Phi_{i,j}^+, \sum_{a0} \delta K_{\infty,j} \Phi_{0,j}) = \sum_j a_{\text{дат},ij} \delta K_{\infty,j},$$

где индексы i, j относятся к датчику и фрагменту активной зоны с возмущенной размножающей способностью соответственно; Φ_i^+ есть решение сопряженного уравнения типа (4) для источника в месте расположения датчика; $\Phi_{i,j}^+$ — среднее значение этого решения на j -м участке с возмущенной реактивностью. Аналогично возмущение $K_{эф}$

$$\frac{\delta K_{эф}}{K_{эф}} = \frac{\sum_j \delta K_{\infty,j} \Phi_{кр,j}^2}{\sum_j K_{\infty,j} \Phi_{кр,j}^2} = \sum_j a_{K_{эф},j} \delta K_{\infty,j}.$$

Тогда для одинакового по активной зоне коридора допустимых изменений K_{∞} поиск максимально возможного отклонения $K_{эф}$ принимает вид следующей задачи линейного программирования:

$$\begin{aligned} & - \sum_j a_{K_{эф},j} \delta K_{\infty,j} \rightarrow \min; \\ & \sum_j a_{\text{дат},ij} \delta K_{\infty,j} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, I; \\ & -\delta K \leq \delta K_{\infty,j} \leq \delta K, \end{aligned} \quad (11)$$

где I — число датчиков.

Для определенности ищется максимально возможное $K_{эф}$. Вследствие симметричности ограничений (11) относительно знака $\delta K_{x,j}$ возможное уменьшение $K_{эф}$ имеет то же значение по модулю.

Проиллюстрируем влияние локальной неопределенности размножающей способности на примере оптимизации с учетом данного фактора положения датчиков нейтронного потока в промышленном уран-графитовом реакторе [3] — большом реакторе с графитовым замедлителем. Его расчетную модель сформировали в пределах возможностей изложенной методики и, в частности, двумерного описания. Тем не менее были учтены основные черты рассмотренных реакторов, определяющие двумерную форму нейтронного потока. Среди них необходимо отметить особенности размещения каналов СУЗ, решетка которых в своем охвате ограничена центральной частью активной зоны со смещением в направлении левой верхней части картограммы (или, как еще говорят, на северо-запад). Поэтому в остановленном реакторе со всеми погруженными стержнями СУЗ поле нейтронов как условно-критическое, так и подкритическое с источником смещается на периферию активной зоны, достигая своего максимума в ее правой нижней части за пределами решетки СУЗ. Свойства реактора в некоторых отношениях соответствуют приближениям расчетной методики, что улучшает представительность полученных с ее помощью результатов в данном конкретном случае. Так, при анализе макрораспределения нейтронного потока сечение поглощения нейтронов допустимо принять постоянным. Кроме того, как показал анализ, неопределенность размножающей способности преобладает над другими факторами, например, неточностью знаний о свойствах источника в отношении влияния на отклонения $K_{эф}$ при постоянном потоке нейтронов датчиков.

Расчеты по оптимизации расположения датчиков проводили для двух состояний реактора: 1) с полностью погруженными стержнями при подкритичности 0,03 и 2) при подкритичности 0,015, что отвечает началу вывода реактора в критическое состояние и середине этого процесса соответственно. Рассматривали два варианта выхода на подкритичность 0,015: путем извлечения стержней СУЗ в периферийном кольце и равномерно по решетке СУЗ. В реакторе размещали шесть датчиков, один из которых установлен вблизи центра активной зоны, остальные — в вершинах правильного пятиугольника с центром в середине активной зоны. Периферийные датчики располагаются таким образом, что один из них находится в части картограммы с максимальным нейтронным полем. Активную зону разделяли на 173 участка по числу в реакторе ячеек периодичности. Такая пространственная сетка для рассматриваемого числа датчиков (их шесть) хорошо воспроизводит возможность непрерывного, точнее говоря, поячеечного возмущения размножающей способности. Уравнения (11) включают в себя по числу участков активной зоны с возмущением размножающей способности 173 переменных и $173 + I$, т.е. число этих же участков плюс дополнительно число датчиков, ограничений. В разложении (10) использовалась 121 радиально-азимутальная гармоника (рис. 3).

Результаты расчетов для разного удаления периферийных датчиков от центра активной зоны приведены в таблице.



Р и с. 3. Решение оптимизационной задачи (11) для варианта 3 с удалением периферийных датчиков от центра на 0,7 радиуса активной зоны: 1 — области вокруг датчиков с $\delta K_{\infty} = -0,01$; 2 — область с $\delta K_{\infty} = 0,01$

Согласно полученным результатам с уменьшением подкритичности точность ее оценки по показаниям датчиков улучшается, что соответствует закономерностям, отмеченным при рассмотрении одномерной модели. Отметим, что для наилучшего в каждом конкретном состоянии реактора расположения датчиков чувствительность $K_{\infty\phi}$ сопоставима с той, которую можно получить, если каждый из датчиков с примыкающей к нему областью активной зоны уподобить рассмотренной одномерной модели.

Оптимальное расположение датчиков отчетливо связано с распределением нейтронного потока. В вариантах 1 и 2 с максимумом поля на периферии наилучший результат достигается при значительном удалении от центра пяти периферийных датчиков, в варианте 3 с более равномерным полем

Чувствительность возможной вариации $K_{\infty\phi}$ в промышленном уран-графитовом реакторе к возмущению локальной размножающей способности при постоянных показаниях датчиков

Вариант	Подкритичность	Удаление периферийных датчиков от центра активной зоны в единицах ее радиуса	$(\delta K_{\infty\phi}/K_{\infty\phi})/\delta K$
1	0,03	0,47	0,52
		0,58	0,39
		0,70	0,38
		0,82	0,46
2	0,015 (извлечены периферийные стержни СУЗ)	0,47	0,38
		0,58	0,27
		0,70	0,22
		0,82	0,26
3	0,015 (стержни СУЗ извлечены равномерно)	0,47	0,19
		0,58	0,21
		0,70	0,24
		0,82	0,30

предпочтительнее сосредоточение датчиков в центральной области активной зоны. При постоянном положении датчиков в процессе вывода реактора в критическое состояние можно рекомендовать размещение периферийных датчиков на удалении 0,7 радиуса загрузки от центра зоны, что позволяет минимизировать максимально возможную погрешность. Для неопределенности локальной размножающей способности промышленного реактора 1% возможная неточность детектирования подкритичности составит около 0,004 для подкритичности 0,03 и 0,002 для подкритичности 0,015.

Таким образом, при консервативном допущении о возможности неблагоприятного сочетания возмущений размножающей способности последние составляют

существенный фактор неточности контроля подкритичности остановленного реактора по показаниям внутризонных датчиков. Данная погрешность растет при редком расположении датчиков и увеличении подкритичности и, как показывает пример рассмотрения промышленного уран-графитового реактора, в физически большом реакторе при разумном числе датчиков может превысить 10%.

Автор благодарен А.А. Мясникову, Т.Е. Трофимовой, С.М. Костареву за помощь в проведении расчетов и оформлении статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.
1. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1984.
3. Дегтярев А.М., Мясников А.А. Устойчивость нейтронного поля конверсионной загрузки промышленных уран-графитовых реакторов в отношении высокочастотных колебаний. — Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 5, с. 331—336.

Поступила в Редакцию 26.09.03

УДК 621.039.573

ВАРИАНТЫ АПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ С ФОРСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ИМПУЛЬСОВ

Колесов В.Ф., Хоружий В.Х. (РФЯЦ — ВНИИЭФ)

Ранее [1] были рассмотрены варианты импульсного реактора в форме кругового цилиндра с осевой полостью. В качестве материала активной зоны предполагали использовать уран-молибденовый сплав и композитное уран-графитовое топливо — материалы, положительные свойства которых надежно засвидетельствованы их практическим применением в действующих импульсных реакторах. Приемлемые конфигурации реактора с коротким импульсом n -, γ -излучения искали на базе систем с активной зоной из уран-молибденового сплава, мощного реактора с большой внутренней полостью — на базе систем с уран-графитовой активной зоной.

Варианты импульсного реактора, рассмотренные в работе [1], характеризуются большой полостью для облучения испытываемых образцов, высоким флюенсом нейтронов и дозы γ -излучения за импульс. Однако длительность генерируемых в них импульсов — 150—200 мкс в реакторе с уран-молибденовой активной зоной и 2 мс в уран-графитовом реакторе — не удовлетворяет предъявляемым требованиям. В некоторых случаях импульсные реакторы, несмотря на большой объем их полостей, должны обеспечивать возможность генерирования импульсов с шириной на половине высоты от 20 до 100 мкс.

Как продолжение поиска вариантов реактора, по возможности полно удовлетворяющих указанному требованию, в настоящей статье рассмотрены одинарные (односекционные) реакторы с активной зоной из нептуний-галлиевого сплава, а также связанные двухсекционные системы, составленные одинарным импульсным реактором и ведомой им подкритической сборкой. Предполагали, что во второй системе будут использованы устройства конвертирования и отражения n -, γ -излучения. Принципы действия и характеристики конверторов и рефлекторов n -, γ -излучения детально исследованы в работах [2—6].