

О стабилизации поля тепловыделения в быстром реакторе при помощи органов управления

Г. Б. УСЫНИН, В. А. ШИБАЕВ, В. А. ЧИРКОВ

УДК 621.039.562.24

Работоспособность твэлов быстрого реактора в значительной степени зависит от их температуры. Наибольшую нагрузку несет оболочка твэлов, поэтому снижение ее температуры при сохранении средней температуры теплоносителя на выходе из реактора является важной задачей. Для достижения этой цели проводится распределение расхода теплоносителя согласно кривой тепловыделения по радиусу реактора. При идеальном гидравлическом профилировании подогревы в отдельных ячейках одинаковы и средний подогрев по реактору совпадает с максимальным подогревом теплоносителя. На практике такое положение никогда не наблюдается в основном из-за следующих обстоятельств:

1. Происходит перераспределение мощности отдельных твэлов вследствие изменения как изотопного состава горючего, так и локального потока нейтронов. Это обусловлено перераспределением делящихся материалов по реактору во время работы (в центре активной зоны вторичное горючее накапливается быстрее, чем на ее периферии, увеличивается количество плутония в зоне воспроизводства). Расход же теплоносителя в ячейке должен соответствовать максимально возможной мощности за все время работы.

2. При распределении расхода теплоносителя по пакетам приходится ориентироваться на наиболее напряженную ячейку; из-за неравномерности тепловыделения подогревы в остальных ячейках будут меньше.

3. Теплоноситель, поступающий на охлаждение стержней управления, подогревается в целом незначительно. Это объясняется, во-первых, трудностью правильного распределения расхода теплоносителя внутри самого пакета со стержнем и, во-вторых, тем, что элементы стержня только часть времени интен-

сивно выделяют тепло (пока находятся в области высокого потока нейтронов).

4. Часть теплоносителя расходуется непроизводительно (протечки в межпакетное пространство, охлаждение элементов конструкции и др.).

В результате всех этих обстоятельств происходит разбавление нормально подогретого теплоносителя теплоносителем недогретым.

Определим фактор разбавления D следующим образом:

$$D = \frac{\text{Максимальный подогрев теплоносителя в какой-либо ячейке}}{\text{Средний подогрев по реактору}} = \frac{\Delta T_{\text{макс}}}{\Delta T} \quad (1)$$

При идеальном профилировании $D = 1$ и обеспечивается максимально возможный подогрев теплоносителя при заданной предельной температуре оболочки.

Фактор разбавления может быть рассчитан по формуле

$$D = 1 + \frac{\int \Delta T_{\text{нд}}(\mathbf{r}) g(\mathbf{r}) dS}{\Delta T \int g(\mathbf{r}) dS} \quad (2)$$

где $g(\mathbf{r})$ — удельный весовой расход теплоносителя в точке \mathbf{r} ; $\Delta T_{\text{нд}}(\mathbf{r})$ — недогрев теплоносителя до максимального уровня:

$$\Delta T_{\text{нд}}(\mathbf{r}) = \Delta T_{\text{макс}} - \Delta T(\mathbf{r}).$$

Интегрирование проводится по сечению, перпендикулярному направлению движения теплоносителя. Величину разбавления $d = D - 1$ можно представить в виде суммы разбавлений, обусловленных перечисленными выше причинами:

$$D = 1 + \sum_j d_j \approx \prod_j (1 + d_j) = \prod_j D_j \quad (3)$$

Разбавление, связанное с топливными пакетами, можно разбить на две части, одна из которых определяется перераспределением мощности по реактору в процессе работы и равна

$$d_1 = \frac{\int \omega_{\text{макс}}(r) dS}{W} - 1, \quad (4)$$

где $\omega_{\text{макс}}(r)$ — максимальный тепловой поток в точке r за все время работы, вт/см^2 ; W — полная мощность реактора.

Вторая часть появляется вследствие группирования твэлов в пакеты с равномерным распределением расхода теплоносителя по сечению:

$$d_2 \approx (\bar{K}_{\Pi} - 1) \frac{\int g(r) dS}{\int g(r) dS}. \quad (5)$$

Здесь средний коэффициент неравномерности \bar{K}_{Π}

$$\bar{K}_{\Pi} \approx \frac{\int K_{\Pi}(r) \omega_{\text{макс}}(r) dS}{\int \omega_{\text{макс}}(r) dS}, \quad (5a)$$

где $K_{\Pi}(r)$ — коэффициент неравномерности тепловыделения по сечению пакета, расположенного в точке r . При таком определении \bar{K}_{Π} не учитывается перераспределение тепловыделения в результате перегрузок.

Интегрирование в числителе проводится по области, занимаемой топливными пакетами активной зоны. Аналогичный вид должно иметь выражение для разбавления, связанного с неравномерностью тепловыделения в пакетах боковой зоны воспроизводства.

Если пренебречь подогревом теплоносителя на органах управления, то

$$d_3 = \frac{\int_{S_{\text{упр}}} g(r) dS}{\int g(r) dS} D. \quad (6)$$

Интеграл в числителе берется по площади, занимаемой органами управления.

Разбавление вследствие непроизводительных протечек примем равным нулю. При первой оценке множитель D в правой части выражения (6) нужно считать равным единице.

Размещение органов управления реактивностью в активной зоне влияет на стабильность поля тепловыделения и, следовательно, на величину d_1 . Наибольшее влияние на поле тепловыделения оказывают компенсаторы выгорания, если в качестве наполнителя в них использован поглощающий материал (бор или тантал [1]). Эффективность компенсаторов выгорания зависит от режима работы и перегрузок горю-

чего. Чем больше интервал непрерывной работы реактора на номинальной мощности, тем больший запас реактивности обрабатывается компенсаторами.

Для исследования влияния положения компенсаторов выгорания на поле тепловыделения были выполнены расчеты быстрого реактора мощностью 1000 Мвт (эл.) с активной зоной, имеющей уплощение 2,7 и среднюю энергонапряженность $\sim 400 \text{ квт/л.}$ [2]. Объемные доли окисного горючего, натрия и стали приняты равными 0,45; 0,33; 0,22 соответственно.

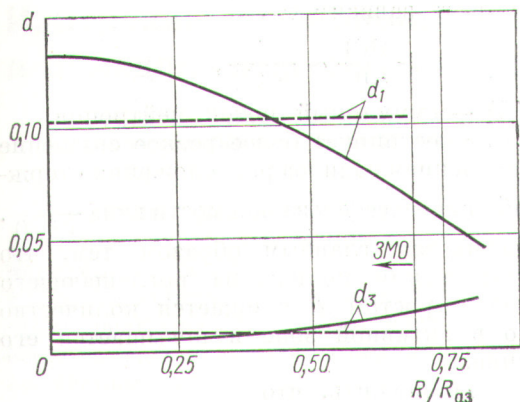
При расчете d_1 предполагалось, что огибающая максимальных тепловых потоков $\omega_{\text{макс}}(r)$ может быть построена по наибольшему из двух значений, соответствующих состояниям реактора до и после перегрузки.

Составы горючего в различных зонах реактора при этих состояниях определялись по методике, изложенной в работе [3]. Предполагалось также, что активная зона перегружается за кампанию дважды, а на ее загрузку идет плутоний, не содержащий высших изотопов. Расчет состава боковой зоны воспроизводства проводился при условии, что ее перегрузка осуществляется одновременно с перегрузкой активной зоны. Учитывался вклад в энерговыделение изотопов не выше Pu^{242} для активной зоны и Pu^{239} для экранов. Определение $\omega_{\text{макс}}(r)$ выполнялось с учетом изменения суммарной мощности топливного пакета, включая мощность экранных частей. Все расчеты распределения нейтронов осуществлялись в диффузионном 18-групповом приближении.

Указанный режим перегрузки активной зоны примерно соответствует непрерывной работе реактора на номинальной мощности в течение года. Чтобы обеспечить компенсацию изменения реактивности за такой период работы, расчетная эффективность поглощающих стержней должна быть равной $\sim 2\%$.

Рассматривались варианты размещения компенсаторов выгорания из естественного карбида бора в центральной области зоны малого обогащения и в кольцевых областях. При этом радиус кольца варьировался, а его площадь принималась постоянной.

После перегрузки реактора компенсаторы выгорания полностью погружены в активную зону и извлекаются из нее так, что перед перегрузкой они оказываются полностью выведенными из активной зоны. При расчете деформации распределения нейтронов поглотитель размещивался в соответствующей кольцевой зоне.



Р и с. 1. Зависимость разбавления d от радиуса расположения компенсаторов выгорания в активной зоне: — — — — — равномерное расположение компенсаторов в зоне малого обогащения (ЗМО).

По результатам расчетов была построена зависимость разбавления d_1 от радиуса расположения компенсаторов выгорания (рис. 1).

На рис. 1 представлена также зависимость $d_3 (R/R_{a.з})$, вычисленная в предположении, что расход теплоносителя через пакет с компенсатором составляет 30% расхода через топливный пакет, размещенный на том же радиусе.

Стабильность поля тепловыделения увеличивается, если располагать компенсаторы выгорания дальше от центра активной зоны. Качественно результаты рис. 1 можно объяснить следующим образом. Статистический вес горячего и всей зоны малого обогащения (центральной) по мере работы реактора увеличивается, так как внутренний коэффициент воспроизводства (K_B) в ней больше единицы, а статистический вес периферийной зоны большого обогащения, наоборот, уменьшается. То же самое происходит и со средними макроскопическими сечениями деления в зонах. Помещая регулирующие органы из поглотителя на периферию активной зоны, можно частично компенсировать перераспределение статистических весов зон различного обогащения в процессе выгорания и стабилизировать поле тепловыделения в реакторе. Это справедливо для реакторов, у которых внутренний $K_B (K_{B.a.з})$ меньше единицы и реактивность уменьшается во время работы. Если $K_{B.a.з} > 1$, то для повышения стабильности поля тепловыделения стержни целесообразнее размещать в центре активной зоны.

С увеличением радиуса расположения компенсаторов выгорания растет их число, а следовательно, и непроизводительный расход теп-

лоносителя через пакеты с органами управления. Это выражается в увеличении d_3 с ростом $R/R_{a.з}$. Учет d_3 несколько снижает преимущества размещения компенсаторов на больших радиусах.

Соотношение концентраций основного делящегося элемента в зонах различного обогащения должно подбираться для каждого варианта расположения органов управления.

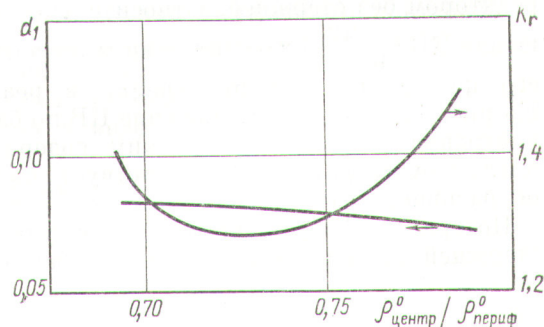
На рис. 2 показана зависимость разбавления d_1 и коэффициента неравномерности тепловыделения по радиусу K_r от соотношения обогащений загружаемого горючего при фиксированном расположении борных стержней на границе зон.

Разбавление d_1 слабо зависит от $\rho_{центр}^0/\rho_{периф}^0$. Можно рекомендовать на первом этапе расчетных исследований проводить оптимизацию расположения стержней по величине разбавления, добиваясь стабильности поля тепловыделения, и во вторую очередь подбором соотношения обогащений снижать K_r .

Ниже приведены средние коэффициенты неравномерности по пакетам \bar{K}_{II} и разбавление d_2 , вычисленные для рассматриваемого реактора при различных размерах пакета под ключ L :

$L, \text{ мм}$	\bar{K}_{II}	d_2
90	1,056	0,050
130	1,075	0,066
170	1,091	0,079
210	1,106	0,091

В таблице представлены результаты расчета перегревов оболочки твэлов вследствие разбавления нормально подогретого теплоносителя. Предполагалось, что компенсаторы выгорания расположены на границе зон различного обо-



Р и с. 2. Зависимость d_1 и K_r от соотношения обогащений загружаемого горючего $\rho_{центр}^0/\rho_{периф}^0$.

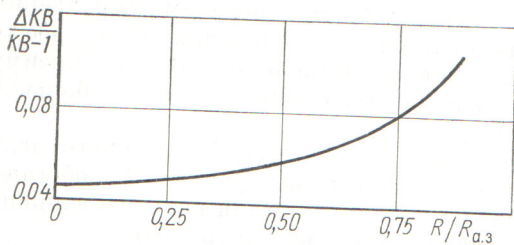


Рис. 3. Уменьшение КВ, обусловленное борными компенсаторами выгорания, в зависимости от радиуса расположения компенсаторов в активной зоне (эффективность компенсаторов ~ 2%).

гащения, а средний подогрев теплоносителя по реактору равен 200° С.

Результаты расчета перегревов оболочки твэлов при разбавлении теплоносителя

Причина перегрева	Разбавление	Перегрев оболочки, °С
Перераспределение мощности при работе реактора	0,063	11
Недогрев теплоносителя в пакетах с борными стержнями	0,008	1
Неравномерность тепловыделения по пакетам активной зоны (L=96 мм)	0,052	10
Совместное действие всех вышеуказанных факторов	0,123	22

Из полного перегрева оболочки, обусловленного разбавлением, примерно половина связана с нестабильностью поля тепловыделения при работе реактора между перегрузками.

Наличие регулирующих стержней в активной зоне в целом ухудшает баланс нейтронов и снижает КВ по сравнению с аналогичным реактором без стержней. Относительное уменьшение КВ ($\frac{\Delta KB}{KB-1}$) зависит от вида поглотителя, его количества и расположения в реакторе. На рис. 3 приведено уменьшение КВ по балансу нейтронов в реакторе с таким содержанием поглотителя, которое соответствует половине оперативного запаса реактивности.

Потери в КВ увеличиваются с удалением стержней от центра реактора. Грубая оценка

предсказывает зависимость

$$\frac{\Delta KB}{KB} \sim \frac{1}{\Phi(R)},$$

где $\Phi(R)$ — суммарный поток нейтронов.

Рис. 3 иллюстрирует более резкое снижение КВ с увеличением радиуса расположения стержней, приближающееся к зависимости вида $\frac{1}{\Phi^2(R)}$.

Это объясняется главным образом тем, что кроме увеличения количества поглощающего материала с ростом R снижается количество горючего в активной зоне и повышается его обогащение.

Если предположить, что

$$\frac{\Delta KB}{KB} = A \frac{\Delta K_{эфф}}{K_{эфф}} \quad (7)$$

(где $\frac{\Delta K_{эфф}}{K_{эфф}}$ — суммарная эффективность стержней), то из представленных результатов следует, что коэффициент A изменяется от 0,8 до ~ 2 при увеличении R от нуля до ~ 0,8R_{a.з.} В работе [11] приведен коэффициент A = 1 ÷ 1,2 (независимо от места расположения стержней), что в среднем согласуется с данными расчетами.

Таким образом, перемещение регулирующих стержней ближе к периферии активной зоны, с одной стороны, может способствовать снижению максимальной температуры оболочки твэлов, а с другой — приводит к ухудшению воспроизводства ядерного горючего, увеличению числа стержней и их приводов. Если считать максимальную температуру оболочки твэлов заданной, то в зависимости от способа размещения стержней можно получить различный общий подогрев теплоносителя по реактору при одинаковом общем расходе, т. е. различную мощность. Поэтому следует ожидать положительного экономического эффекта при переходе от центрального расположения компенсаторов к расположению их на некотором оптимальном радиусе.

Поступила в Редакцию 9/VI 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Орлов и др. Kernenergie, Н. 4, 112 (1969).
2. А. И. Новожилков и др. Kernenergie, Н. 7, 230 (1969).
3. Г. Б. Усынин. «Атомная энергия», 25, 466 (1968).