

где E_0 и ΔE — выработка электроэнергии соответственно до понижения мощности и в процессе понижения мощности. Для четвертой кампании уменьшение топливной составляющей равно $\sim 4\%$, а для пятой — $5,5\%$.

Полученный опыт работы с понижением мощности перед перегрузкой горючего позволяет планировать удлиненную работу станции и в последующие кампании.

Поступила в Редакцию 12/VI 1970 г.
В окончательной редакции 24/VIII 1970 г.

Контроль за полями энергосвечения по относительной эффективности стержней регулирования

И. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Б. Г. ДУБОВСКИЙ, Ю. В. ЕВДОКИМОВ,
Л. В. КОНСТАНТИНОВ, И. К. ПАВЛОВ, В. В. ПОСТНИКОВ,
Э. И. СНИТКО, Г. А. ШАШАРИН

Загрузка активной зоны реакторов Белоярской АЭС (БАЭС) [1] состоит из испарительных каналов (ИК) с обогащением 1,5; 2 и 3% по U^{235} , в которых осуществляется подогрев и частичное испарение воды (весовое паросодержание на выходе составляет $\sim 25\%$), и пароперегревательных каналов (ППК), в которых пар перегревается до рабочей температуры около 520°C .

Компенсация реактивности холодных реакторов в начале кампании осуществляется 64 (первый блок) и 78 (второй блок) стержнями ручного регулирования (РР) и несколькими стержнями системы двухпозиционных компенсирующих стержней (СДКС).

Контроль за мощностью ИК обычными теплотехническими методами требует измерений паросодержания в каждом канале, что влечет за собой необходимость использования сложных и дорогостоящих датчиков. В связи с этим на БАЭС отработан метод контроля за полями энергосвечения, основанный на измерениях относительной эффективности стержней РР.

Известно [2], что для «больших» уран-графитовых реакторов справедливо соотношение

$$N(r) = \text{const} \sqrt{\Delta\rho}, \quad (1)$$

где $N(r)$ — невозмущенная плотность нейтронов в точке r ; $\Delta\rho$ — реактивность, обусловленная введением поглотителя в точку r .

Соотношение (1) нарушается вблизи существенных неоднородностей и на границах активной зоны с отражателем. Как показали расчеты, наличие в реакторе первого блока БАЭС трех

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Я. Крамеров и др. «Атомная энергия», 17, 427 (1964).
2. Ф. Я. Овчинников и др. Там же, 27, 270 (1969).
3. А. Н. Новиков и др. Fuel Burn-Up Predictions in Thermal Reactors, Vienna, IAEA, 1968.
4. Ю. И. Митяев. «Атомная энергия», 30, 242 (1971).

УДК 621.039.54

зон с различным соотношением графита, урана и конструкционных материалов приводит к отклонениям от соотношения (1), не превышающим 2% на расстояниях более 0,5 м от отражателя.

При определении радиальных полей энергосвечения $W(r)$ описываемым методом используется понятие «макрополя» энергосвечения топливных каналов (ТК) и «микроструктуры» поля [3] аналогично тому, как это было предложено для распределений плотности нейтронов [4]. Макрополем $W_m(r)$ условно называется проинтерполированное по всему реактору радиальное распределение мощности ТК данного типа, имеющих одинаковое выгорание и удаленных от введенных стержней регулирования, пустых ячеек или от других локальных неоднородностей более чем на условный радиус влияния $r_{вл} = 0,5$ м.

Под микроструктурой поля энергосвечения $\varphi(r)$ подразумевается распределение, описывающее относительные изменения мощности ТК вблизи локальных неоднородностей так, что

$$W(r) = W_m\varphi(r). \quad (2a)$$

При этом считается, что

$$\varphi(r) = \xi_T(r) \prod_i \xi_i(|r - b_i|), \quad (2b)$$

где $\xi_T(r)$ — коэффициент, зависящий только от конструкции, исходного обогащения и выгорания урана в ТК, расположенном в точке r ; $\xi_i(|r - b_i|)$ — коэффициент, учитывающий локальную неоднородность, расположенную в точке b_i . Для $|r - b_i| \geq r_{вл}$ значения $\xi_i = 1$.

При таком подходе задачу дискретного контроля за распределениями мощности ТК можно свести к определению значений макрополя в отдельных точках, интерполяции этих значений и последующему введению поправок, учитывающих микроструктуру поля для каждого ТК.

Экспериментально было показано, что допущения, заложенные в данном подходе, приводят к среднеквадратичной погрешности в определении мощности ТК, не превышающей 2%.

В процессе пуска и эксплуатации реакторов БАЭС было изучено соотношение между макрополем $W_m(r)$, полученным с помощью формул (2а) и (2б), и относительным распределением величин $V \Delta \rho(r)$. Среднеквадратичное расхождение между этими распределениями не превышало 2%, если при перемещении РР изменение его эффективности составляло не более $(15 \div 20) \cdot 10^{-3} \beta_{\text{эфф}}$, а расстояние от места расположения РР до границы зоны с отражателем было более 50 см. При этом наличие вблизи РР пустой ячейки, ТК различного обогащения или типа не приводило к отклонениям от соотношения (1) за указанные пределы. Поэтому в расчетах описываемым методом в качестве значений макрополя в местах установки стержней РР использовались значения $V \Delta \rho(r)$.

В процессе измерения в основном использовались стержни РР, находящиеся в крайних положениях и перемещаемые поочередно на одинаковые расстояния с последующим возвратом в исходное положение.

Опыт эксплуатации обоих реакторов показал, что в промежуточном положении обычно находится не более 20–30% стержней РР. Для полностью введенных (выведенных) стержней РР измеряются $\Delta \rho_i$ (введ) [$\Delta \rho_i$ (вывед)] — относительные эффективности одинаковых участков стержней при их перемещении из исходного положения на 10–15% их полной эффективности путем перекомпенсации с помощью одного из двух автоматических регуляторов мощности (АР). Значения относительного макрополя в местах расположения полностью введенных стержней РР рассчитываются по формуле

$$W_m^{\text{отн}} = V \Delta \rho_i (\text{вывед}), \quad (3)$$

а для полностью введенных стержней по формуле

$$W_m^{\text{отн}} = m V \Delta \rho_i (\text{введ}), \quad (4)$$

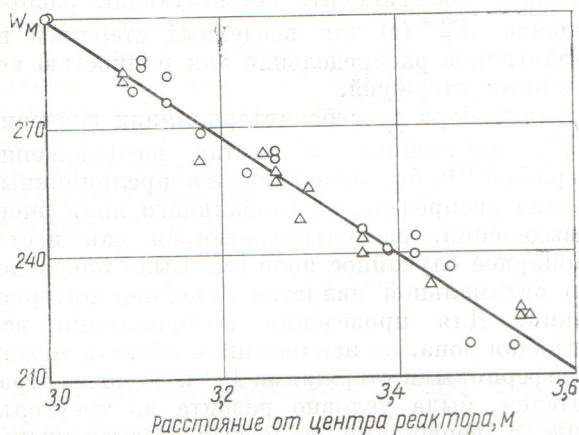
где m — коэффициент, нормирующий распределение $W_m^{\text{отн}}(r)$ для введенных стержней на аналогичное распределение для полностью введенных стержней.

Для выбора способа интерполяции значений $W_m^{\text{отн}}$, полученных в местах расположения стержней РР, был использован корреляционный анализ распределения глобального поля энерговыделения, рассматривавшегося как нестационарное случайное поле [5]. Было показано, что оптимальной является линейная интерполяция. Для проведения интерполяции вся активная зона, за исключением области между периферийными стержнями РР и боковым отражателем, была условно разбита на треугольники с вершинами в местах расположения стержней РР. В пределах каждого треугольника значения $W_m^{\text{отн}}$ для ТК рассчитывались путем плоскостной интерполяции по значениям $W_m^{\text{отн}}$ в вершинах треугольника. Значения $W_m^{\text{отн}}$ для периферии активной зоны рассчитывались по значениям $W_m^{\text{отн}}$ на линиях, соединяющих периферийные стержни РР, и по измеренному другим методом градиенту макрополя на периферии реактора. Неоднократные измерения, выполненные путем теплотехнических измерений мощности ИК в некипящем режиме работы реактора при пониженной мощности, и измерения γ -активности ТК на остановленном реакторе показывают, что радиальное изменение макрополя на периферии активной зоны хорошо описывается линейным законом и практически не имеет угловой зависимости в пределах 2–3%, несмотря на сложную форму границы активной зоны с отражателем (рис. 1).

Эти результаты были подтверждены путем активации стальной проволоки в горизонтальном экспериментальном канале на номинальной мощности и путем измерений распределений плотности нейтронов с помощью малогабаритных камер деления в процессе пуска реактора [3].

Опыт эксплуатации реакторов БАЭС показал, что относительная радиальная зависимость макрополя на периферии активной зоны практически не зависела (в пределах 1–2%) от перегрузок ТК различного типа и оставалась постоянной в течение всего прошедшего периода работы (с 1964 г.).

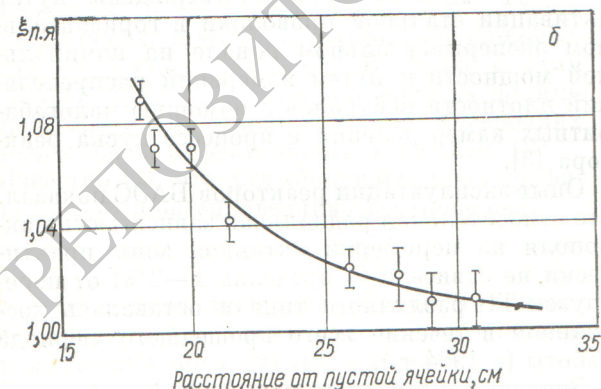
Значения коэффициентов ξ_i и ξ_t получены на основании измерений, проведенных на физическом стенде и на реакторе как на малых, так и на номинальных уровнях мощности [3].



Р и с. 1. Относительный ход макрополя W_M на периферии активной зоны, измеренный по остаточной γ -активности ТК на остановленном реакторе:

○ — ИК с обогащением 2%; Δ — ИК с обогащением 3%.

Эти коэффициенты определялись путем сравнения распределений энерговыделения до и после введения возмущения. Кроме того, ξ_i и ξ_T были



Р и с. 2. Относительное распределение энерговыделения в однотипных ТК вблизи полностью введенного стержня РР ξ_{PP} (а) и вблизи пустой ячейки $\xi_{П.Я.}$ (б). Указана среднеквадратичная погрешность эксперимента.

получены методом наименьших квадратов с учетом минимума погрешности определения мощности ТК с помощью выражения (2). Коэффициенты, полученные обоими способами, совпадают в пределах экспериментальной погрешности. Распределения ξ_i ($|r - b|$) для основных локальных неоднородностей приведены на рис. 2, а, б. Коэффициенты ξ_T , определяемые видом ТК, практически не зависят от неоднородностей активной зоны и составляют для свежих каналов 0,91; 1,09; 1,00 и 1,27 соответственно для ТК первого блока с обогащением 1,5 и 2% и для ТК второго блока с обогащением 2 и 3%. В процессе эксплуатации для каждого ТК учитывается изменение ξ_T на основании расчетной зависимости ξ_T от энерговыработки данного канала.

Следует отметить, что значения коэффициентов ξ_i были получены как величины, усредненные для различных возможных компоновок активной зоны в месте введения возмущения. Отличие усредненных значений от реальных невелико (1—2%).

Распределение абсолютных мощностей ТК $W(r)$ периодически определяется по описываемой методике путем нормировки полученного относительного распределения на полную мощность реактора. Расчеты $W(r)$ на основании измерений величин $\Delta\rho$ проводятся по специальной программе на ЭВМ. Оперативный контроль за относительными изменениями полей энерговыделения на обоих блоках БАЭС осуществляется путем регистрации относительных изменений приращений теплосодержания пара в отдельных ППК.

Погрешность описываемого периодического контроля за мощностью ТК определяется многими факторами, из которых наиболее существенны следующие.

1. Нарушение соотношения (1), обусловленное: а) отличием распределения плотности нейтронов в активной зоне от распределения ценности; б) использованием в измерениях относительно сильных поглотителей; в) различием относительных распределений плотности нейтронов по высоте реактора на разных расстояниях от его оси.

2. Погрешность допущений, сделанных при представлении распределения мощности по реактору в виде формул (2), и погрешность интерполяции макрополя.

3. Погрешность, обусловленная выбранным методом расчета макрополя на периферии активной зоны с использованием экспериментально полученной радиальной зависимости

относительного макрополя вблизи границы зоны с отражателем.

4. Погрешность определения коэффициентов микроструктуры ξ_i и ξ_t .

5. Погрешность измерения величин $\Delta\rho$ путем перекомпенсации с помощью АР.

6. Возможное различие исходных поглощающих свойств стержней РР или погрешности при учете их выгорания.

7. Погрешность измерения полной тепловой мощности реактора.

Сложное взаимодействие погрешностей, обусловленных различными факторами, затрудняет оценку результирующей погрешности метода на основании отдельных ее составляющих. Поэтому наибольшее внимание при экспериментальном исследовании данного метода контроля было уделено определению его метрологических характеристик путем сравнения с распределениями, полученными другими способами. Среднеквадратичная относительная погрешность метода σ определялась из уравнений:

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{W_i}{W_{Ii}} \left(\frac{\overline{W_{Ii}}}{W_i} \right) - 1 \right]^2 = \sigma^2 + \sigma_{Ii}^2;$$

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{W_i}{W_{IIi}} \left(\frac{\overline{W_{IIi}}}{W_i} \right) - 1 \right]^2 = \sigma^2 + \sigma_{IIi}^2; \quad (5)$$

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[\frac{W_{Ii}}{W_{IIi}} \left(\frac{\overline{W_{IIi}}}{W_{Ii}} \right) - 1 \right]^2 = \sigma_{Ii}^2 + \sigma_{IIi}^2,$$

где n — число ТК, в которых мощность измерена описываемым методом (W_i) и двумя независимыми контрольными методами (W_{Ii} и W_{IIi}); σ_{Ii} и σ_{IIi} — среднеквадратичные относительные погрешности контрольных методов.

Эксперименты показали, что погрешность описываемого метода распределена по нормальному закону, а σ составляет $\sim 4\%$. В качестве контрольных методов использовались измерения относительной активности извлеченных ТК, активация стальных проволок в горизонтальных экспериментальных каналах, теплотехнические измерения в ИК при некипящих режимах работы каналов и т. д.

На рис. 3 для сравнения приведено диаметрально-распределение энерговыделения, полученное описываемым методом и путем измерения γ -активности ТК на остановленном реакторе второго блока.



Рис. 3. Распределение энерговыделения по одному из диаметральных направлений реактора, полученное путем измерения остаточной γ -активности ТК (1) и описываемым методом (2).

Основное преимущество метода заключается в том, что для его применения не требуется установка специальных датчиков контроля за распределениями энерговыделения в активной зоне, а могут использоваться штатные стержни регулирования.

Метод позволяет проводить измерения во всем диапазоне мощностей, начиная с минимального контролируемого уровня.

Описанный метод может найти применение на больших графитовых реакторах, имеющих средства оперативного контроля за относительными изменениями мощностей ТК (например, измерения температуры однофазного теплоносителя на выходе отдельных каналов), для проведения периодических измерений полей энерговыделения.

В заключение авторы выражают признательность А. Я. Евсееву, И. М. Кисилю и М. Е. Минашину за помощь в выполнении работы и полезные критические замечания.

Поступила в Редакцию 12/IX 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Доллежалъ и др. «Атомная энергия», 5, 223 (1958).
2. А. Д. Галанин. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1957, стр. 151.
3. Б. Г. Дубовский и др. Доклад № 29 на Международной конференции по физическим проблемам проектирования реакторов на тепловых нейтронах (Лондон, 1967).
4. А. М. Вейнберг. В кн. «Теория ядерных реакторов». Под ред. Т. Биркхофа и Э. Вигнера. М., Госатомиздат, 1963, стр. 22.
5. Е. С. Вентцель. Теория вероятностей. М., «Наука», 1964.