

ля герметичности оболочек твэлов при освоённой на Кольской АЭС глубине выгорания подтверждают возможность использования в ВВЭР-440 топлива повышенного обогащения.

Наличие нескольких реакторов в составе АЭС обеспечивает свободу экономического маневра и позволяет, варьируя энергоёмкость топливных загрузок в зависимости от сложившейся конкретной ситуации, добиваться внутростанционной оптимизации использования топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренко В. А. Вопросы безопасности работы реакторов ВВЭР. М., Атомиздат, 1977.
2. Овчинников Ф. Я. и др. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. М., Атомиздат, 1977.
3. Шишов А. Н. и др. Экономика энергетики СССР. М., Высшая школа, 1979.
4. Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 1973. Vienna, 1974, IAEA-168.

Поступила в Редакцию 28.05.80

УДК 621.039.50

Регулирование энергораспределения реактора второго блока Белоярской АЭС

БОЖЕНКОВ О. Л., ДУНАЕВ В. Г., КУЗНЕЦОВ Н. А., ЛУКЬЯНЕЦ И. А., МАЛЬЦЕВ В. В., ПОТАПЕНКО П. Т., САРЫЛОВ В. Н., СНИТКО Э. И., ФИЛИПЧУК Е. В., ШЕЙНМАН А. Г.

Эксплуатация реакторов АМБ Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова (БАЭС) продемонстрировала экономическую эффективность ядерного перегрева пара, получившего в настоящее время дальнейшее развитие в проекте РБМ-КП [1]. При эксплуатации энергетических реакторов данного типа в активной зоне необходимо поддерживать выравненное энергораспределение и оптимальное по тепловому балансу соотношение мощностей на получение и перегрев пара. Поэтому опыт решения этих проблем применительно к действующим реакторам БАЭС полезен и при разработке эффективных алгоритмов управления РБМ-КП.

В настоящей работе предложен алгоритм управления положениями регулирующих стержней (РС) на стационарных уровнях мощности для реактора АМБ-200, который обеспечивает наилучшее в смысле выбранной целевой функции выравнивание энергораспределения при заданном множестве технологических ограничений.

Постановка задачи. Загрузка АМБ-200 включает 998 технологических каналов (ТК): 732 испарительных (ИК), 266 перегревателей (ПК), последние располагаются в центре активной зоны, чередуясь рядами с ИК. В активной зоне реактора размещены также 78 РС.

Регламент работы реактора требует обеспечивать строго определенное соотношение мощности перегревательного и испарительного контуров ($\pi = N_{\text{ПК}}/N_{\text{ИК}} = \text{const}$) и поддерживать выравненное по радиусу активной зоны энергораспределение $Q(r)$ [2]. На практике это достигается физическим профилированием: соответствующим расположением ТК с разным обогащением урана и РС, а также профилированием выгорания топлива по радиусу реактора. При этом для физических расчетов активная зона в соответствии с расположением ТК условно разделяется на четыре концентрические области, характеризующиеся заданными сред-

ними значениями коэффициента размножения нейтронов $k_{\infty i}$.

В условиях эксплуатации перегрузки ТК и выгорание урана выбираются так, чтобы в конце интервала работы (перед перегрузкой топлива) средние значения $k_{\infty i}$ в каждой выделенной области соответствовали заданным. В течение межперегрузочного периода отклонения средних значений коэффициента размножения от заданных $|\Delta k_{\infty i} = k_{\infty i} - k_{\infty i}^0|$ ($i = 1, \dots, 4$) стремятся поддерживать на минимальном уровне соответствующим перераспределением глубины погружения РС [2]. Выполнение этой операции на практике связано с необходимостью оперативного анализа большого объема информации, характеризующей фактическое состояние реактора. Чтобы исключить возможные ошибочные действия оператора и повысить надежность и качество регулирования на этом уровне, целесообразно использовать ЭВМ, отдавая ей функцию советчика оперативному персоналу по оптимальному ведению технологического процесса.

В соответствии с регламентом работы реактора цель управления может быть сведена к минимизации компонентов вектора $\Delta Q(r) = Q(r) - Q^0(r)$, характеризующего отклонение фактического энергораспределения $Q(r)$ от энергораспределения $Q^0(r)$, однозначно определяемого заданным распределением коэффициента размножения $k_{\infty}^0(r)$. Правомерность такого подхода вытекает из того, что для заданной длительности интервала работы реактора между перегрузками ТК и системы условий, определяющих его завершение (среднее выгорание выгружаемого топлива и сохранение критичности на полной мощности с равновесным содержанием ксенона при полном извлечении всех РС из активной зоны), коэффициент неравномерности энергораспределения принимает минимальное значение, если от начала и до конца интервала

работы энергораспределение остается постоянным [3].

Во время работы реактора на мощности, близкой к предельной, необходимо обеспечивать надежный отвод тепла от активной зоны, гарантирующий отсутствие аварий из-за ухудшения теплоотдачи. Например, необходимо, чтобы температура оболочек твэлов не превышала максимально допустимого значения [4]. Поэтому на реакторах АМБ вводятся следующие технологические ограничения, для ПК — по температуре перегрева пара на выходе из них, а для ИК — по запасу до предельной мощности. Учитывая это, задача управления реактором, при котором достигается наилучшее в течение всего интервала между перегрузками выравнивание энергораспределения, окончательно может быть сформулирована как задача поиска компонентов вектора управления (перемещений РС), обеспечивающих при соблюдении технологических ограничений наилучшее приближение к энергораспределению $Q^0(r)$.

Математическая модель реактора. Специфика задачи стабилизации стационарного энергораспределения позволяет при построении математической модели реактора использовать линеаризованные уравнения относительно малых отклонений (возмущений) от стационарных значений параметров. При этом реактор как объект управления удобно рассматривать в совокупности с интегральным регулятором общей мощности. Тогда его математическая модель может быть представлена в виде статической передаточной матрицы, полученной на основе экспериментальных данных [5].

В ноябре 1977 г. сотрудники НПО «Энергия» А. Аникин и А. Овешков на реакторе второго блока БАЭС экспериментально определили, как влияют РС на энергораспределение и температуру пара на выходе из ПК, перемещая отдельные РС, регистрируя соответствующие этим перемещениям установившиеся значения токов ДПЗ и температуры пара. Результаты этих экспериментов использовались ими при построении на основе физического расчета математической модели реактора для задачи оптимизации энергораспределения.

В настоящей работе для описания реактора как объекта регулирования использован иной подход, в основе которого лежит гармоническая модель нейтронного поля реактора. Для разработки такой модели было необходимо выявить наиболее характерные пространственные гармоники нейтронного поля, возбуждаемые при перемещении РС. С этой целью в октябре 1978 г. на АМБ-200 авторы настоящей статьи выполнили эксперименты, в ходе которых регистрировались показания ДПЗ и термопар на выходе ПК при перемещении отдельных РС и групп РС (от двух до четырех стержней одновременно). Результаты этих экспериментов и были использованы в настоящей работе для расчета коэффициентов передаточной мат-

рицы реактора, использованной при определении оптимальных перемещений РС.

Методика обработки экспериментов сводилась к следующему. Относительные изменения мощности контролируемых каналов вычисляли по измеренным до и после перемещения РС показаниям ДПЗ. Приращение плотности потока нейтронов в произвольной точке активной зоны представлялось в виде линейной комбинации аппроксимирующих функций заданного вида, с достаточной для практических целей точностью описывающих такие наиболее характерные для рассматриваемого реактора гармоники, как первая радиальная, первая и вторая азимутальные. Влияние высших гармоник учитывалось добавлением функций влияния РС, вычисленных на основе физического расчета. Причем гармоники, упомянутые ранее, из функции влияния исключались.

Амплитуды аппроксимирующих функций вычисляли по методу наименьших квадратов из условия наилучшего приближения аппроксимирующего распределения в точках контроля к экспериментальным данным. По найденным таким образом значениям амплитуд и известному виду аппроксимирующих функций определяли коэффициенты передаточной матрицы реактора. Учитывалось также, что стержни автоматического регулятора общей мощности при отработке возмущающих воздействий могут возбуждать первую радиальную и вторую азимутальную гармоники. Проверка адекватности разработанной модели эксперименту показала, что среднее квадратическое отклонение энергораспределения, полученное в эксперименте и на модели при перемещении одних и тех же РС, составляет $\sim 1\%$.

Формализация задачи. Алгоритм вычислений. Практическая приемлемость линеаризованных моделей для описания реактора как объекта управления в стационарных режимах позволяет при разработке алгоритмов оптимального управления использовать эффективные математические методы теории линейного программирования. Некоторые варианты такого подхода к проблеме оптимального управления энергораспределением для отечественных реакторов впервые были рассмотрены в работах [6, 7]. В работе [6] предложено решение задачи формирования оптимального в смысле минимума коэффициента запаса до предельной мощности профиля энергораспределения с использованием стандартного симплекс-метода.

В отличие от работы [6] в настоящей работе используется целевая функция, определяемая регламентом эксплуатации реактора АМБ и характеризующая максимальный модуль отклонения фактического энергораспределения от заданного, а теплотехнические ограничения учитываются так, что выравнивание энергораспределения достигается при сохранении заданного уровня теплотехнической надежности. Кроме того, при разработке

программы для ЭВМ использован более эффективный алгоритм модифицированного симплекс-метода, что позволило по сравнению с работой [6] примерно на порядок сократить время вычислений.

Выберем в качестве компонентов Q_i и Q_i^0 векторов Q и Q^0 мощности ТК активной зоны при фактическом и заданном энергораспределении. Чтобы исключить чрезмерные требования к объему оперативной памяти ЭВМ, по аналогии с работой [6] разобьем активную зону на p поличейек с числом ТК в каждой из них M_p и определим для каждой поличейейки среднюю мощность ТК при фактическом и заданном энергораспределении:

$$\hat{Q}_p = \frac{1}{M_p} \sum_{i=1}^{M_p} Q_i, \quad \hat{Q}_p^0 = \frac{1}{M_p} \sum_{i=1}^{M_p} Q_i^0, \quad p = 1, \dots, P. \quad (1)$$

Изменение отклонения средней мощности ТК каждой поличейейки от ее значения при заданном энергораспределении как функция вектора управления на k -м шаге регулирования с учетом выражения (1) записывается в виде

$$\Delta \hat{Q}_p^{(k)} = \hat{Q}_p^{(k-1)} - \hat{Q}_p^0 + \frac{1}{M_p} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^{M_p} Q_i^{(k-1)} a_{ij} \right) \delta \rho_j^{(k)}, \quad p = 1, \dots, P, \quad (2)$$

где a_{ij} — коэффициенты статической матрицы модели реактора; $\delta \rho_j^{(k)}$ — реактивность, вносимая j -м РС на k -м шаге регулирования; n — число РС.

Теплофизические расчеты и практика эксплуатации показывают, что выбор на предельной мощности АМБ-200 практически не оказывают влияния те ИК, для которых коэффициент запаса до предельной мощности канала K^3 превышает 1,3 [4]. Это позволяет учитывать теплотехнические ограничения вида

$$z_i^{k-1} \left(1 + \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta \rho_j^{(k)} \right) \leq z_{\max} \quad (3)$$

только для тех ИК, у которых значения $K_i^{3(k-1)}$ удовлетворяют соотношению $K_i^{3(k-1)} \leq 1,3 + \Delta$, где $z_i^{(k-1)} = 1/K_i^{3(k-1)}$; $z_{\max}$ — константа, обратно пропорциональная минимально допустимому при заданном уровне теплотехнической надежности реактора значению коэффициента запаса; Δ — значение, устанавливаемое экспериментально при условии не снижения K^3 в ИК, не включенных в неравенства (3), до значения меньшего 1,3 на k -м шаге регулирования.

С учетом линейности модели реактора ограничения по температуре перегрева пара на выходе из ПК могут быть записаны в виде неравенства:

$$T_l^{(k-1)} + \xi_l \sum_{j=1}^n a_{lj} \delta \rho_j^{(k)} \leq T_{\max}, \quad (4)$$

где $T_l^{(k-1)}$ — температура пара на выходе из l -го ПК в конце $(k-1)$ -го шага регулирования; ξ_l — коэффициент пропорциональности, связывающий относительное изменение мощности l -го ПК с приращением температуры пара на его выходе; $T_{\max}$ — предельно допустимая температура пара на выходе из ПК. Так как радиальное энергораспределение АМБ-200 достаточно стабильно, для сокращения общего числа ограничений целесообразно учитывать неравенства (4) только для тех ПК, температура пара на выходе из которых превышает среднюю по реактору температуру перегрева.

Дополнив неравенства (3) и (4) соотношениями вида

$$\alpha_j^{(k)} \leq \delta \rho_j^{(k)} \leq \beta_j^{(k)}, \quad \alpha_j^{(k)} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (5)$$

(здесь $\alpha_j^{(k)}$ и $\beta_j^{(k)}$ — нижнее и верхнее предельные значения вносимой j -м РС реактивности, которые определяются регламентными требованиями) и

$$\gamma^{(k)} - \varepsilon \leq \sum_{j=1}^n \delta \rho_j^{(k)} \leq \gamma^{(k)} + \varepsilon, \quad (6)$$

где $\gamma^{(k)}$ — постоянная, определяющая перекомпенсацию стержней автоматического регулятора общей мощности; ε — погрешность поддержания баланса реактивности, которая выбирается в пределах погрешности системы контроля за положением РС, получим полное множество ограничений задачи в виде соотношений (3)–(6). В качестве целевой функции задачи оптимального управления положениями РС выберем норму $L_\infty = \max_{p=1, \dots, P} |\Delta \hat{Q}_p^{(k)}|$, характеризующую максималь-

ный по всем поличейейкам модуль разности средней мощности ТК поличейейки при фактическом и заданном энергораспределении. Тогда исходная задача приводится к виду задач линейного программирования введением неотрицательной переменной $y = \max_{p=1, \dots, P} |\Delta \hat{Q}_p^{(k)}|$ и дополнением системы ограничений (3)–(6) неравенствами

$$-y \leq \Delta \hat{Q}_p^{(k)} \leq y, \quad p = 1, \dots, P. \quad (7)$$

Задача линейного программирования, эквивалентная исходной задаче управления, формируется так [8]:

Минимизировать y (8)

при ограничениях (3)–(7) с $\Delta \hat{Q}_p^{(k)}$, определяемыми соотношениями (2).

С помощью введения дополнительных переменных в соотношения (3)–(7) задача (8) легко приводится к каноническому виду задач линейного программирования, причем для получения первого допустимого базисного решения оказывается достаточным ввести одну искусственную переменную. При этом матрица коэффициентов канониче-

ской формы задачи (8) содержит приблизительно 90% нулевых элементов. Это позволило эффективно использовать алгоритм модифицированного симплекс-метода с мультипликативным представлением обратной матрицы, который обладает значительными преимуществами по сравнению со стандартной формой симплекс-метода в точности скорости и объеме требуемой памяти ЭВМ [9]. Причем эти преимущества обусловлены именно слабой заполненностью (разреженностью) исходной матрицы коэффициентов задачи линейного программирования.

Разреженность матрицы коэффициентов задачи (8) позволяет также эффективно использовать память ЭВМ за счет применения компактной формы хранения исходной матрицы, при которой в оперативной памяти размещаются только ее ненулевые элементы [10]. Для сравнения укажем, что в стандартной форме симплекс-метода для размещения в памяти ЭВМ только начальной симплексной таблицы задачи (8) с общим числом соотношений (3)–(7), не превышающим 450, потребовался бы объем оперативной памяти, приблизительно равный 800 кбайт. В модифицированной форме с компактным хранением этот объем снижается до значения, не превышающего 100 кбайт.

Таблица 1

Исходные параметры для расчета оптимальных перемещений РС без учета (а) и с учетом (б) ограничений (9)–(11)

Параметр	3×3ТК		4×4ТК	
	а	б	а	б
Число полиячеек	124	124	69	69
$\max \Delta \hat{Q}_p^{(k)} $, кВт	153,3	153,5	145,9	145,9
Число РС	40	40	40	40
Средняя мощность, кВт				
по всем ТК	427,7	427,7	427,7	427,7
по ТК 3 и 4 квадрантов	436,0	436,0	436,0	436,0
по ТК 1 и 2 квадрантов	419,6	419,6	419,6	419,6
Средняя температура пара на выходе, °С				
по всем ПК	499,8	499,8	499,8	499,8
по ПК 3 и 4 квадрантов	501,6	501,6	501,6	501,6
по ПК 1 и 2 квадрантов	497,9	497,9	497,9	497,9
Число температурных ограничений [неравенства (4)]	132	124	132	139
Общее число ограничений в задаче линейного программирования	424	422	314	317

Таблица 2

Параметры реактора, полученные в результате перемещений РС, вычисленных по программе оптимизации

Параметр	3×3ТК		4×4ТК	
	а	б	а	б
$\max \Delta \hat{Q}_p^{(k)} $, кВт	117,9	120,3	104,5	110,3
Процент изменения				
$\max \Delta \hat{Q}_p^{(k)} $	—23,2	—21,6	—28,4	—24,4
Средняя мощность ТК, кВт				
3 и 4 квадрантов	420,5	427,0	421,1	427,3
1 и 2 квадрантов	433,0	426,6	432,6	426,2
Средняя температура перегретого пара для ПК, °С				
3 и 4 квадрантов	494,2	498,7	494,5	498,8
1 и 2 квадрантов	506,8	501,2	505,9	501,3
Время расчета оптимальных перемещений РС, мин	29,6	39,5	24,3	23,5

В качестве иллюстрации ниже приведены результаты расчета оптимальных перемещений РС для фактического состояния АМБ-200 на 17.12.79г. Расчеты выполнены на ЭВМ ЕС-1022 с объемом оперативной памяти 256 кбайт с помощью специально разработанной на языке ФОРТРАН IV программы, реализующей алгоритм модифицированного симплекс-метода с мультипликативным представлением обратной матрицы и компактной формой хранения исходных данных.

Фактическая тепловая мощность реактора составляла 420 МВт. Основные параметры, характеризующие энергораспределение и температуру пара на выходе ПК, и общее число ограничений для решавшихся эквивалентных задач линейного программирования, приведены в табл. 1. В табл. 2 представлены параметры реактора, полученные в результате оптимальных перемещений РС, для двух размеров полиячеек.

Из табл. 2 видно, что реализация оптимальных перемещений РС, вычисленных при решении задачи (8) с системой ограничений (3)–(7), уменьшает максимальный по всем полиячейкам модуль отклонения средней мощности ТК более чем на 20%. Однако при этом сохраняется перекоп средней мощности и средней температуры пара для ТК, размещенных в 1 и 2, 3 и 4 квадрантах активной

зоны (см. графу *a* табл. 2) и относящихся к разным петлям технологического контура. Поскольку в петлях необходимо поддерживать равные или близкие значения технологических параметров, устранение этого перекося является одним из существенных условий эксплуатации АМБ-200. Поэтому в систему ограничений задачи (8) необходимо ввести дополнительные условия:

$$- \varepsilon_Q \leq \frac{1}{N_{34}} \sum_{i=1}^{N_{34}} Q_i^{(k-1)} - \frac{1}{N_{12}} \sum_{j=1}^{N_{12}} Q_j^{(k-1)} + \\ + \sum_{l=1}^n \left(\frac{1}{N_{34}} \sum_{i=1}^{N_{34}} Q_i^{(k-1)} a_{il} - \frac{1}{N_{12}} \sum_{j=1}^{N_{12}} Q_j^{(k-1)} a_{jl} \right) \delta \rho_l^{(k)} \leq \varepsilon_Q; \quad (9)$$

$$- \varepsilon_Q \leq \frac{1}{N_{14}} \sum_{i=1}^{N_{14}} Q_i^{(k-1)} - \frac{1}{N_{23}} \sum_{j=1}^{N_{23}} Q_j^{(k-1)} + \\ + \sum_{l=1}^n \left(\frac{1}{N_{14}} \sum_{i=1}^{N_{14}} Q_i^{(k-1)} a_{il} - \frac{1}{N_{23}} \sum_{j=1}^{N_{23}} Q_j^{(k-1)} a_{jl} \right) \delta \rho_l^{(k)} \leq \varepsilon_Q; \quad (10)$$

$$\varepsilon_T \leq \frac{1}{M_{34}} \sum_{i=1}^{M_{34}} T_i^{(k-1)} - \frac{1}{M_{12}} \sum_{j=1}^{M_{12}} T_j^{(k-1)} + \\ + \sum_{l=1}^n \left(\frac{1}{M_{34}} \sum_{i=1}^{M_{34}} \xi_i a_{il} - \frac{1}{M_{12}} \sum_{j=1}^{M_{12}} \xi_j a_{jl} \right) \delta \rho_l^{(k)} \leq \varepsilon_T, \quad (11)$$

где N_{12} , N_{34} , N_{14} , N_{23} — число ТК соответственно в 1 и 2, 3 и 4, 1 и 4, 2 и 3 квадрантах активной зоны; M_{12} и M_{34} — число ПК в 1 и 2, 3 и 4 квадрантах; ε_Q и ε_T — погрешность поддержания средней мощности и температуры перегретого пара соответственно.

Выполнение неравенств (9) и (10) исключает возбуждение первой азимутальной гармоники при реализации оптимальных управляющих воздействий. Неравенство (11) устраняет возможность перекося по средней температуре перегретого пара в ПК, расположенных в 1 и 2, 3 и 4 квадрантах активной зоны соответственно.

Результаты решения задачи (8) с системой ограничений (3)–(7), (9)–(11) для ε_Q и ε_T , равных 2,5 кВт и 2,5°C соответственно, приведены в графе *b* табл. 2, из которой видно, что введение дополнительных ограничений (9)–(11) приводит практически к полному выравниванию значений средней мощности ТК и средней температуры пара в 1 и 2, 3 и 4 квадрантах активной зоны. Достоин-

ство такого подхода в том, что при близком к неустойчивости энергораспределении ограничения вида (9)–(11) позволяют резко снизить необходимую частоту решения оптимизационной задачи.

В заключение необходимо отметить, что увеличение размеров полячейки с 3×3 ТК до 4×4 ТК практически не влияет на параметры расчетного энергораспределения и в то же время сокращает время вычисления оптимальных управляющих воздействий с 30–40 до 24 мин.

Выводы. С учетом особенностей эксплуатации задача управления энергораспределением реактора АМБ-200 может быть сформулирована как задача поиска наилучшего на заданном множестве технологических ограничений приближения к форме энергораспределения $Q^0(r)$, однозначно определяемой заданным распределением коэффициента размножения $k_\infty^0(r)$.

Алгоритм расчета оптимальных перемещений РС, использующий процедуру модифицированного симплекс-метода с мультипликативным представлением обратной матрицы базиса совместно с компактной формой хранения в памяти ЭВМ коэффициентов исходной матрицы ограничений, обеспечивает приемлемое время счета. Для сравнения укажем, что при стандартной форме симплекс-метода время расчета оптимальных перемещений РС на ЭВМ БЭСМ-6 составляло ~20 мин. [6]. Введение дополнительных ограничений вида (9)–(11) устраняет возбуждение первой азимутальной гармоники при реализации оптимальных управляющих воздействий и снижает необходимую частоту повторного решения оптимизационной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батуров Б. Б. и др. — Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 2, с. 126.
2. Викулов В. К. и др. — Там же, 1971, т. 30, вып. 2, с. 132.
3. Потапенко П. Т. и др. — Атомная техника за рубежом, 1980, № 2, с. 3.
4. Шейнман А. Г. и др. — Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1978, № 6, с. 15.
5. Филипчук Е. В., Потапенко П. Т. Регулирование пространственного распределения энерговыделения в ядерном реакторе. М., изд. МИФИ, 1978, ч. 1.
6. Емельянов И. Я. и др. — Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 4, с. 310.
7. Емельянов И. Я. и др. — Там же, вып. 6, с. 483.
8. Canon M., Cullum C., Polak E. Theory of Optimal Control and Mathematical Programming. N.Y., McGraw-Hill Book Company, 1970.
9. Лэсдон Л. Оптимизация больших систем. М., Наука, 1975.
10. Тьюарсон А. Разреженные матрицы. М., Мир, 1977.

Поступила в Редакцию 07.07.80