

тировку блока детектирования в течение 5—8 сут без дозаправки жидким азотом и позволяло использовать транспортную упаковку для серийных ППД.

На стенде была обследована кассета ВВЭР-440. Начальное обогащение составляло 1,6%, среднее выгорание 12 кг/т U, продолжительность выдержки после облучения 3 года. В спектрах γ -излучения были четко выделены линии с энергией 605 (^{134}Cs), 624 (^{106}Ru), 662 (^{137}Cs), 796 и 802 кэВ (^{134}Cs) и некоторые другие.

Относительное распределение выгорания по высоте кассеты определяли по скорости счета фотонов в фотопике ^{137}Cs (рис. 2). Коэффициент неравномерности выгорания по высоте кассеты K_z оказался равным $1,40 \pm 0,1$.

Выгорание топлива в кассете определяли по отношению скоростей счета в фотопиках ^{134}Cs (605 кэВ) и ^{137}Cs (662 кэВ) в 8 точках по высоте кассеты (рис. 3). Отклонение полученных значений от экспериментальной прямой не превышает $\pm 12\%$.

Измерения показали возможность определения выгорания топлива в облученных кассетах с помощью прибора «Арагонит» на стенде, установленном непосредственно в бассейне хранилища облученных кассет на АЭС.

Поступило в Редакцию 29.VI.78
В окончательной редакции 11.IX.78

УДК 621.039.512.45

Метод минимизации неравномерности энергораспределения в ядерном реакторе

ПОБЕДИН В. В., СИМОНОВ В. Д.

Минимизация неравномерности энергораспределения в активной зоне реактора является одной из задач внутриреакторного управления ядерным топливом. При известном составе топливной загрузки реактора она состоит в определении компоновки топливных кассет, обеспечивающей минимум коэффициента неравномерности энергораспределения в активной зоне.

Пусть имеется I различных наборов $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_I$ нейтронно-физических характеристик N топливных кассет ($I \leq N$), образующих активную зону реактора, и вектор ρ_0 задает ее состав:

$$\rho_0 = \underbrace{\{\rho_1, \rho_1, \dots, \rho_1\}}_{N_1} \underbrace{\{\rho_2, \rho_2, \dots, \rho_2\}}_{N_2} \dots \underbrace{\{\rho_I, \rho_I, \dots, \rho_I\}}_{N_I}$$

$$\sum_{i=1}^I N_i = N.$$

Обозначим x_n координатную точку (или группу точек), соответствующую n -й ячейке активной зоны. Компоновку активной зоны, т. е. соответствие $\{x_n \rightarrow \rho_i\}$, будем описывать N -мерным вектором $\rho = \{\rho_{i_1}, \rho_{i_2}, \dots, \rho_{i_N}\}$, принадлежащим множеству всевозможных перестановок компонентов вектора ρ_0 ($i_n = 1, 2, \dots, I$).

Если оператор $L(\rho)$ соответствует краевой задаче переноса нейтронов в активной зоне, то задача минимизации неравномерности энергораспределения может быть сформулирована следующим образом.

Найти $\min \|K(\rho)\|_c$, где $\|K(\rho)\|_c = \max_r \left| \frac{\Psi_\rho(r)}{\Psi_\rho(r)} \right|$ и функция $\Psi_\rho(r)$, описывающая энергораспределение в активной зоне, удовлетворяет уравнению $L(\rho) \Psi_\rho(r) = 0$.
Целевой функцией этой нелинейной целочисленной оптимизационной задачи будет коэффициент неравно-

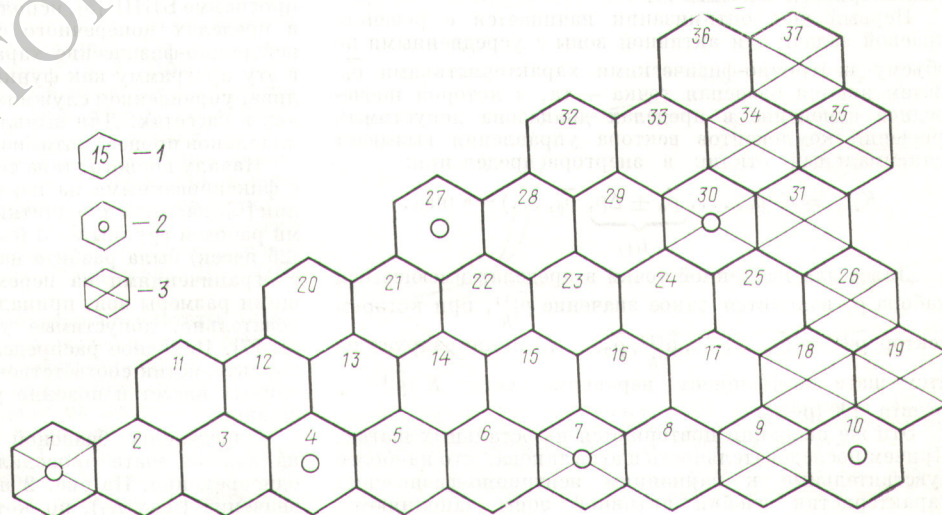


Рис. 1. 30°-ный сектор активной зоны ВВЭР-440:

1 — ячейка активной зоны;
2 — ячейка для кассеты СУЗ; 3 — ячейка с зафиксированной топливной кассетой

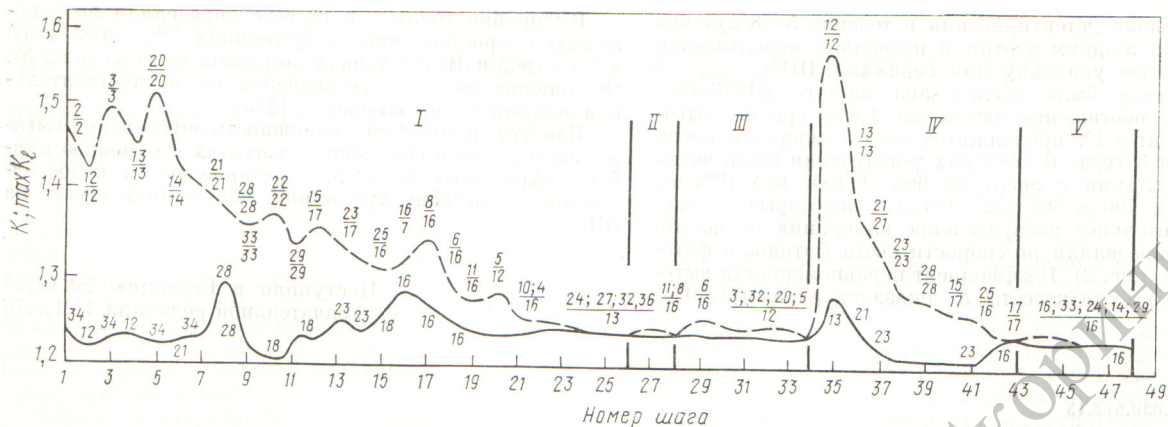


Рис. 2. Последовательность определения базисных узлов и изменение коэффициента неравномерности K в процессе оптимизации:
 - - - - $\max K_l$ (числитель указывает базисный узел, а знаменатель — узел, в котором достигается $\max K_l$ при внесении возмущения $\bar{\rho}_0 \pm \Delta\rho$); — — — — K (число указывает ячейку с кассетой максимальной мощности)

мерности энергораспределения $K(\rho)$, а управлением — вектор ρ . Предположим, что $K(\rho)$ является аналитической функцией. Тогда в окрестности точки $\bar{\rho}_0 = (\bar{\rho}_1, \bar{\rho}_2, \dots, \bar{\rho}_N)$ она с точностью до $o(\rho_i - \bar{\rho}_0)^2$ может быть представлена в виде $K(\rho) = \sum_{i=1}^N f_i(\rho_i)$

и для решения задачи можно использовать идеи динамического программирования [1], т. е. искать решение как результат N -шагового процесса последовательного определения компонентов $\hat{\rho}_{in}$ вектора оптимального управления $\hat{\rho}$.

В соответствии с этим алгоритм решения задачи состоит в нахождении траектории расстановки кассет по мере выбора оптимального управления на каждом шаге оптимизационного процесса. Он включает определение базисной координатной точки — «исследующий поиск» [2] и «поиск по образцу» [3] — определение управления $\hat{\rho}^{(m)}$, минимизирующего коэффициент неравномерности на шаге m .

Первый шаг оптимизации начинается с решения краевой задачи для активной зоны с усредненными по объему нейтронно-физическими характеристиками $\bar{\rho}_0$. Затем ищется базисная точка — та, в которой поочередное изменение в пределах диапазона допустимых значений компонентов вектора управления вызывает максимальный отклик в энергораспределении:

$$K_{l(1)} = K(\bar{\rho}_0, \dots, \underbrace{\bar{\rho}_0 \pm \Delta\rho}_{l(1)}, \bar{\rho}_0, \dots) \rightarrow \max.$$

Далее для найденной точки в пределах имеющегося набора ρ находится такое значение $\hat{\rho}_{i_h}^{(1)}$, при котором вектор $\hat{\rho}^{(1)} = \{\bar{\rho}_0, \dots, \hat{\rho}_{i_h}^{(1)}, \bar{\rho}_0, \dots\}$ минимизирует на этом шаге коэффициент неравномерности $K(\hat{\rho}^{(1)}) = \min \{K(\rho^{(1)})\}$.

Эти же операции повторяются на остальных шагах. Причем последовательность шагов такова, что наиболее чувствительные к вариациям нейтронно-физических характеристик ячейки активной зоны заполняются

в первую очередь и влияние последующих шагов на решение предыдущих нивелируется.

По завершении каждого шага определяется местоположение одной кассеты и число вакантных ячеек и соответствующих им координатных точек уменьшается. Сокращается также число нерасставленных кассет и возможных управлений. Поэтому после каждого шага в той части активной зоны, где есть вакантные ячейки, усреднение нейтронно-физических характеристик проводится вновь. Последнему шагу N соответствует минимальный коэффициент неравномерности энергораспределения.

Предложенный метод реализован в виде программы для ЭВМ. Результаты его применения можно показать на примере минимизации неравномерности распределения мощности кассет в активной зоне ВВЭР-440 [4], состав которой соответствует началу пятой кампании.

Рассматривался 30° -ный сектор периодичности свойств активной зоны с частично погруженными поглотителями рабочей группы кассет СУЗ (ячейки 1 и 7, рис. 1). Распределение мощности кассет рассчитывали по программе БИПР [5], использующей сетку с одним узлом в пределах поперечного сечения кассеты. Поскольку нейтронно-физические характеристики кассет вводятся в эту программу как функции глубины выгорания топлива, управлением служила средняя концентрация шлаков в кассетах. Для выявления влияния исходного поля шлаков процесс оптимизации имел несколько этапов.

Началу первого этапа соответствовала активная зона с фиксированными на периферии, согласно рекомендации [6], кассетами подпитки, а также топливными частями рабочей группы СУЗ (см. рис. 1). Остальная область (26 ячеек) была разбита на четыре зоны в соответствии с ограничениями на перемещения кассет, определяющими размеры зон, принадлежащие им кассеты и, следовательно, допустимые управления для каждой зоны [7]. Исходное распределение нейтронно-физических характеристик соответствовало размещению зафиксированных кассет и позонно усредненным концентрациям шлаков.

Определение базисной координатной точки (узла) на каждом шаге проводилось во всех четырех зонах одновременно. На рис. 2 показана последовательность значений $\{\max K_l\}$, по которым выбирались базисные

узлы, очередность заполнения ячеек кассетами, а также поведение коэффициента неравномерности распределения мощности кассет K в ходе оптимизационного процесса. Компоновка активной зоны завершилась 26-м шагом (участок I), когда коэффициент неравномерности оказался равным 1,246. Особенности его изменения на последовательности шагов обусловлены дискретностью управления.

На втором этапе исходное поле шлаков в активной зоне формировалось путем разбиения центральной области (22 ячейки; дополнительно были зафиксированы кассеты в ячейках 4, 10, 27 и 36), полученной на первом этапе картограммы, на две зоны, обеспечивающие сохранение симметрии компоновки. Эти зоны включали по две подзоны, в каждой были сгруппированы кассеты одного срока пребывания в реакторе. Концентрации шлаков в подзонах усреднялись. Поиск базисных координатных узлов проводился отдельно для каждой подзоны (участки II—V, рис. 2). Этап закончился 48-м шагом. Коэффициент неравномерности снизился до 1,237, что обусловлено перестановкой двух пар кассет, различающихся глубиной выгорания на 0,15 и 0,3 кг/т U.

Следующим этапам предшествовали всевозможные аналогичные варианты усреднения характеристик активной зоны. Во всех случаях результаты отличались от первого не более полученного на втором этапе.

Поступило в Редакцию 4.VI.78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. М., «Мир», 1967.
2. Hook R., Jeeves T. «J. Assoc. Computer», 1962, v. 8, p. 212.
3. Wood C. Application of «Direct Search» to the Solution of Engineering Problems. Westinghouse Res. Lab. Sci. Paper 6-41210-1-P1, 1960.
4. Сидоренко В. А. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 325.
5. Петрунин Д. М., Беляева Е. Д., Киреева И. Л. Препринт ИАЭ-2519. М., 1975.
6. Potter K.-Fr., Riehn V., Suschowk G. «Kernenergie», 1976, Bd 19, N 4, S. 116.
7. Победин В. В., Симонов В. Д. «Kernenergie», 1978, Bd 12, N 3, S. 77.

УДК 541.15:621.039

Об образовании водорода при радиоллизе водяных паров

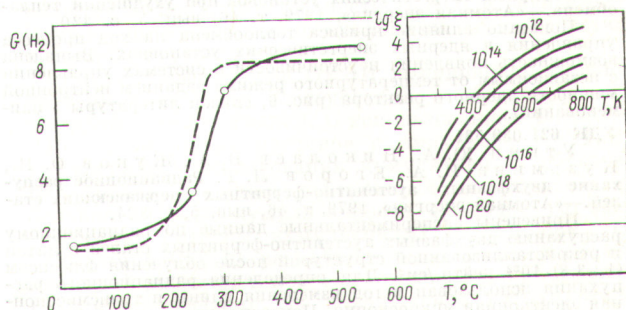
ДЗАНТИЕВ Б. Г., ЕРМАКОВ А. Н., ПОПОВ В. Н.

В последнее время в связи с проблемой водородной энергетики в отечественной и зарубежной литературе [1] широко обсуждаются новые экономичные пути синтеза водорода на основе воды и минерального сырья. Одним из возможных путей решения этой задачи может стать процесс терморadiационного дегидрирования водяных паров (ТРДВ) с использованием тепловой и радиационной составляющих мощности ядерного реактора. Для оценки конкурентоспособности этого метода по сравнению с другими (термоциклы, электролиз и др.) необходимы данные о выходе водорода при радиоллизе водяных паров, особенно в условиях высоких температуры и мощности доз (T, J). Опубликованные данные об эффективности радиационной конверсии $H_2O \rightarrow H_2$ немногочисленны [2] и охватывают узкие области изменения T и J . Вместе с тем из данных по разложению H_2O в присутствии органических добавок [2] следует, что выход атомарного водорода $G_H = 7 \cdot 100^{-1}$ эВ. Тогда в условиях, исключающих потери атомов водорода, в принципе можно достичь значения $G(H_2) \approx G_H \approx 7$. Очевидно, в этом смысле благоприятно увеличение температуры, когда возрастает вклад реакции $H + H_2O \rightarrow H_2$ (энергия активации $E_1 \approx 1$ эВ) и уменьшается роль непродолжительных рекомбинационных процессов: $H + OH$; $H + H$; $OH + OH$.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования процесса радиоллиза паров воды в широком диапазоне T и J . Облучение предварительно очищенной дистиллированной и обезгаженной воды проводили на импульсном ускорителе У-12 в диапазоне температуры 300—900 К по методике, описанной ранее [3, 4]. Контроль за дозой излучения осуществляли с помощью химической дозиметрии ($C_2H_4 \rightarrow H_2$) и других методов. Температуру

облучаемых образцов фиксировали термопарой. Анализ водорода и кислорода проводили хроматографически. Значения $G(H_2)$ определяли по наклонам кинетических кривых. Показано, что в отсутствие радиационного воздействия образование водорода термическим и термодинамическим путем в исследованном интервале температуры не происходит.

Начальный радиационный выход H_2 при облучении паров воды S -образно зависит от температуры (см. рисунок). При $T \leq 150^\circ C$ $G_{мин}(H_2) = 1,6$ и не зависит от T . При $T \geq 350^\circ C$ $G_{макс}(H_2) = 8$ и также не меняется с дальнейшим ростом температуры. Переход от $G_{мин}(H_2)$ к $G_{макс}(H_2)$ осуществляется в относительно



Экспериментальная зависимость (O) радиационного выхода водорода при облучении водяных паров от температуры при $J = 1,8 \cdot 10^{16}$ эВ/(см²·с) и $P_{H_2O} = 760$ мм рт. ст.:

— — — теоретическая кривая $G(H_2) = f(T)$ для той же мощности дозы; на врезке расчетная зависимость $\xi = \xi(T, J)$