

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



15/1-79
РЗ - 11803

Г-935

194 / 2-79

В. Гудовски

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕГО
ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

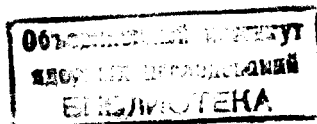
1978

РЗ - 11803

В. Гудовски

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕГО
ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Направлено в АЭ



Гудовски В.

РЗ - 11803

Использование эвристических методов для оптимизации внутреннего топливного цикла в ядерных реакторах

Рассматривается метод оптимизации внутреннего топливного цикла в высокотемпературном ядерном реакторе с газовым теплоносителем. Процесс оптимизации топливного цикла анализируется при помощи методов искусственного интеллекта. Результаты получены в сравнении с другими методами оптимизации.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Gudovsky V.

РЗ - 11803

The Use of Heuristic Methods for Optimization of the Inner Fuel Cycle in Nuclear Reactors

A method for optimization of the inner fuel cycle in HTGR type reactor is considered. Fuel management process chosen is analyzed by means of a heuristic method. The results are compared to previous evaluations of other methods.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы оптимизации топливного цикла в ядерных реакторах за последние годы стали особенно актуальными. Во всех программах развития атомной энергетики стремятся добиться минимальной стоимости энергии. При этом основную роль в оптимизации выработки энергии играет оптимизация цикла ядерного топлива, который обычно делится на две части: внутренний и внешний циклы. Оптимизация внутреннего цикла, очевидно, содержит такие оптимизационные параметры, как шаг решетки, обогащение топлива, расположение регулирующих стержней и так далее. Оптимизация внешнего цикла содержит все факторы, связанные с производством и переработкой топлива. Некоторые проблемы внутреннего и внешнего топливных циклов связаны друг с другом, но многие почти полностью независимы^{/1/}. По проблемам оптимизации топливного цикла есть много работ, в которых используются разные методы математического программирования^{/2-7/}. В наиболее интересных, с точки зрения теории эвристического программирования, делается попытка связать решения о выборе варианта перегрузки активной зоны с текущим состоянием топлива. Такой подход может привести нас к интуитивному пониманию оптимального процесса перегрузок топлива. В одной из этих работ^{/8/} предложен /для 3-зонного ВВР/ "полустанционный метод" с "внутренним условием оптимальности" любых решений, связанных с перегрузкой топлива. Это условие требует сохранения максимального запаса реактивности и сохранения фактора неравномерности

тепловыделения в заданных пределах. Т. Hoshino /9/ сформулировал "полуинтуитивные" правила, которые ведут к оптимальным решениям. В его статье анализируется структура оптимальной стратегии процесса перегрузки с использованием критерия максимального значения среднего выгорания топлива во время кампании реактора.

В настоящей работе также делается попытка найти практические решения задачи, основываясь на полуинтуитивном понимании процесса перегрузки. Предметом изучения является высокотемпературный реактор с газовым теплоносителем, а цель работы можно определить так: найти оптимальную стратегию, т.е. последовательность вариантов перегрузок, которая дает максимальное значение среднего выгорания в конце периода оптимизации при соблюдении определенных ограничений.

2. МОДЕЛЬ РЕАКТОРА И ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчетов модели высокотемпературного реактора используются усовершенствованные программы FEVER^{/12/} и RELOAD FEVER^{/13/} для одномерного анализа кампании реактора на основе 4-групповой библиотеки нейтронных данных.

Активная зона реактора представляет собой цилиндр, разделенный на три зоны /называемые дальше подзонами/ одинакового объема. Активная зона окружена графитовым отражателем. Поток нейтронов и распределение мощности вычисляются, как функции радиальной переменной. В каждой подзоне активной зоны вычисляются концентрации элементов /до 25 компонент/. В активной зоне находятся поглощающие стержни и выгорающие добавки, но они не оптимизировались при дальнейших расчетах. "Перегрузка подзоны" означает перегрузку всех топливных кассет в этой подзоне одновременно.

Оптимизация внутреннего цикла проводится при условии, что мы знаем некоторые параметры из расчетов оптимизации внешнего топливного цикла, такие, как периоды перегрузки, составляющие вектор $\bar{T}(T_i)$, и мощность ядерного реактора между очередными пере-

грузками $\bar{E}(E_i)$. На основе работы^{/14/} принято, что $E_i = 1,15 \cdot 10^8 \text{ Вт} = \text{const}$ и $T_i = 500 \text{ дней} = \text{const}$.

Поскольку высокотемпературные реакторы работают на уран-ториевом топливе с высоким обогащением урана /91%/ , принято, что оптимальная стоимость энергии связана только с выгоранием загруженного урана-235. Влияние коэффициента воспроизводства и возможность продления работы реактора за счет уменьшения мощности в конце кампании не рассматривались в этой работе. Основные данные модели реактора представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные данные модели реактора и оптимизационных параметров

Реактор:

Мощность	- $1,15 \cdot 10^8 \text{ Вт}$
Загрузка активной зоны:	
делящийся материал	- 159,3 кг
сырьевой материал	- 1057,5 кг
обогащение урана	- 91%
геометрия активной зоны	- цилиндр
радиус	- 2,1 м
высота	- 2,286 м
Период оптимизации	- 3000 дн.
Период перегрузки - T_i	- 500 дн.
Количество перегрузок	- 5
Максимальный коэффициент неравномерности тепловыделения PPFMAX	- 2,5+2,8
Максимальное выгорание выгружаемой подзоны - DSBRRMAX	- 100 000 МВт·дн/тт.

· Определены три ограничения на работу реактора:

1. Запас реактивности - ЕХК - должен быть положительным.
2. Выгорание разгруженного топлива из любой подзоны - DSBRR - должно быть меньше, чем максимально допустимое выгорание.
3. Коэффициент неравномерности тепловыделения - PPF - должен быть меньше, чем максимально допустимая величина.

Таблица 2

Варианты перегрузок топлива /F - свежее топливо; 1,2,3 - номер подзоны топлива, из которой взято топливо; S - перемещенное топливо/

Номер варианта (ID)	Варианты			Номер типа	Тип варианта перегрузки		
	Номер подзоны 1	2	3		Номер подзоны 1	2	3
1	F	F	F	1	F	F	F
2	1	F	F	2	S	F	F
3	2	F	F				
4	3	F	F				
5	F	1	F	3	F	S	F
6	F	2	F				
7	F	3	F				
8	1	2	F	4	S	S	F
9	1	3	F				
10	2	1	F				
11	2	3	F				
12	3	1	F	5	F	F	S
13	3	2	F				
14	F	F	1				
15	F	F	2	6	S	F	S
16	F	F	3				
17	1	F	2				
18	1	F	3	7	F	S	S
19	2	F	1				
20	2	F	3				
21	3	F	1				
22	3	F	2	7	F	S	S
23	F	1	2				
24	F	1	3				
25	F	2	1				
26	F	2	3				
27	F	3	1				
28	F	3	2				

Три подзоны активной зоны реактора могут быть перегружены путем замены выгоревшего топлива свежим или за счет перераспределения топлива между подзонами. Это дает 28 возможных решений /табл. 2/, которые обозначаем номером ID.

3. ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Классические методы определения экстремума становятся очень громоздкими вследствие большого количества независимых переменных. Например, для 5 перегрузок с 28 возможными вариантами для каждой из них требуется проанализировать $28^5 \sim 1,7 \cdot 10^7$ "историй" активной зоны. Такой объем расчетной работы практически недоступен для современных вычислительных машин. В этой ситуации разумно использовать эвристический подход, позволяющий коренным образом сократить количество поисков при решении многомерной задачи^{/10/}. Эвристический метод часто называют методом "здорового смысла", использующим упрощения, интуицию и другие хитрости, ограничивающие или направляющие поиски решений. Эвристика не гарантирует оптимальных решений; строго говоря, она вообще не гарантирует решений^{/10/}. Смысл использования эвристического метода заключается в том, что в большинстве случаев он дает достаточно хорошие решения.

Эвристический метод, используемый для оптимизации процесса перегрузок топлива^{/9/}, иллюстрируется рис. 1.

За начало принято определенное состояние предыдущего "конца кампании" ($E_0 L$), в котором проверяется предварительное решение в варианте перегрузки ID и извлекаются эвристические признаки, определяющие это решение и состояние активной зоны реактора. Они извлекаются из состояния "Начало кампании" ($B_0 L$) согласно предварительному варианту перегрузки ID.

Эвристическими признаками являются:

1. Величина ЕХК - запас реактивности в состоянии "Начало кампании".
2. Величина выгорания выгруженной подзоны.
3. Равномерность тепловыделения в активной зоне в состоянии " $B_0 L$ ".

Каждый признак характеризуется своей ценностью, называемой "стоимостью признака":

1. V_1 - величина ЕХК в единицах $0,1 k_{эфф}$.
2. V_2 - выгорание выгруженной подзоны в единицах $30\ 000\ МВт \cdot дн / тт$ /мегаватт - день на тонну топлива/.

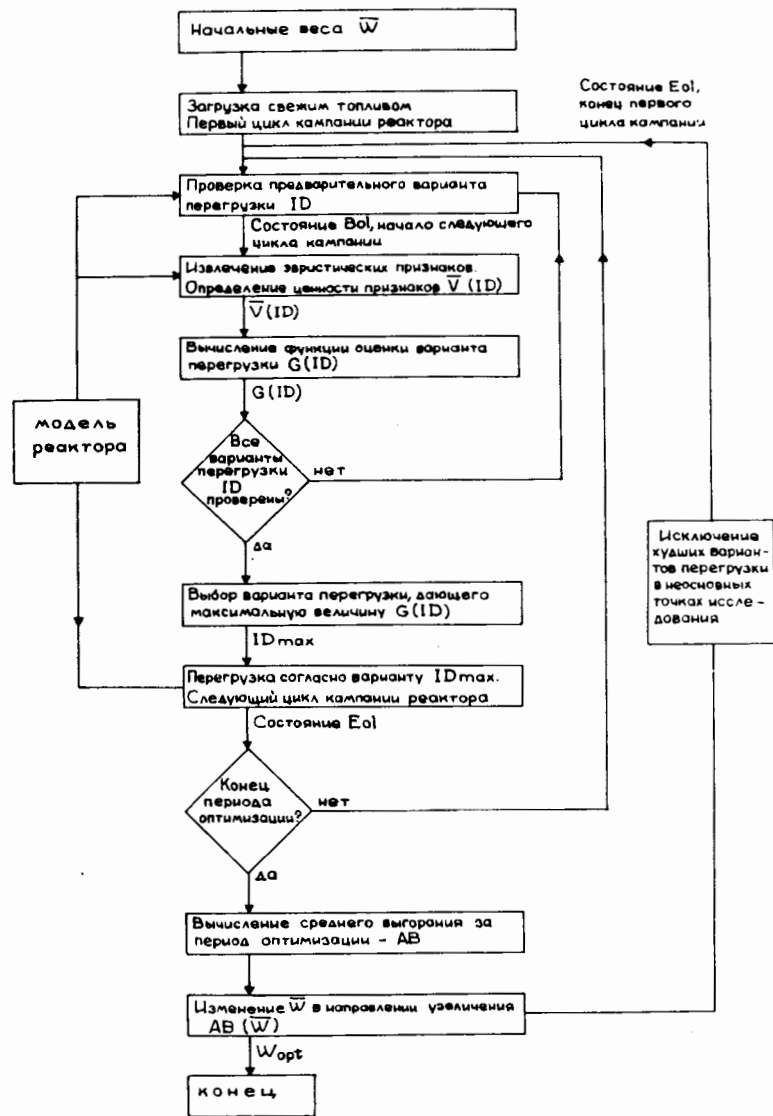


Рис. 1. Схема использования эвристического метода для оптимизации перегрузок топлива.

3. V_3 - обратный коэффициент неравномерности тепло-выделения в единицах 0,5.

Каждому признаку соответствует интуитивное правило перегрузок. Например, признаку /1/ соответствует правило, согласно которому запас реактивности после перегрузки должен быть как можно большим. Аналогично, признаки /4/, /3/ соответствуют правилам увеличения выгорания (DSBR) и уменьшения неравномерности тепловыделения.

Из таких правил, которые, следует заметить, часто противоречат друг другу, можно составить линейную комбинацию и определить "функцию оценки" решения:

$$G(ID) = \bar{W}^T \cdot \bar{V}(ID),$$

где $\bar{W} = (W_1, W_2, W_3)$ - весовой вектор, $\bar{V} = (V_1, V_2, V_3)$ - вектор признаков, зависящий от предварительного решения.

Пока мы уверены в положительном влиянии правил на конечную цель /увеличение среднего выгорания AB/, допускаются произвольные величины весов (W_1, W_2, W_3) .

Наилучшее решение - IDMAX - соответствует максимуму функции оценки решения

$$G(IDMAX) = \max G(ID)$$

ID.

Решение содержит параметры, составляющие весовой вектор \bar{W} . Эти параметры должны быть такими, чтобы любое решение удовлетворяло главному условию - увеличению до максимума среднего выгорания в конце кампании реактора. Определенный таким образом "вес" не зависит от текущего состояния процесса, а только от эксплуатационных и физических условий работы реактора. Следовательно, среднее выгорание AB можно рассматривать как функцию, зависящую от \bar{W} . Основная цель сводится к получению оптимального веса \bar{W}_{opt} , который даст максимум дискретной функции $AB(\bar{W})$.

Так как любой точке в пространстве $AB(\bar{W})$ отвечает определенная стратегия перегрузок, гиперповерх-

ность $AB(\bar{W})$ может быть исследована методом восхождения^{/15/}. Этот алгоритм удобен для анализа дискретных функций вследствие дискретности перегрузок.

Так как \bar{W} обозначает относительную важность эвристических правил, то только направление вектора \bar{W} , который можно записать в полярных координатах (ϕ, θ) :

$$\bar{W} = (W_1, W_2, W_3)$$

$$W_1 = \sin\theta \cos\phi$$

$$W_2 = \sin\theta \sin\phi$$

$$W_3 = \cos\theta,$$

представляет непосредственный интерес.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение выгорающих добавок и поглотителей в активной зоне реактора должно быть таково, чтобы в состоянии "Начало кампании" ($B_0 L$) получить относительно большую неравномерность тепловыделения. Ограничения на DSBR и PPFMAX /табл. 1/ приняты согласно действительным ограничениям в работающих высокотемпературных реакторах^{/14/}.

На рис. 2 представлена топография среднего выгорания топлива в полярных координатах. Поскольку оптимальные веса \bar{W}_{opt} не являются точными величинами из-за дискретности перегрузок, мы можем разделить пространство (ϕ, θ) на зоны одинаковых вариантов перегрузок и, следовательно, одинаковых величин AB .

Из рис. 2 видно, что эвристический метод быстро находит локальные экстремумы /после нескольких попыток/.

Среднее выгорание урана-235 в зависимости от стратегии перегрузок показано в табл. 3, из которой видно, что при данных условиях работы реактора только перегрузки типа SFS /табл. 2/ дают максимальное выгорание топлива. При перегрузках типа FSS и SFF достигаются самые большие неравномерности тепловыде-

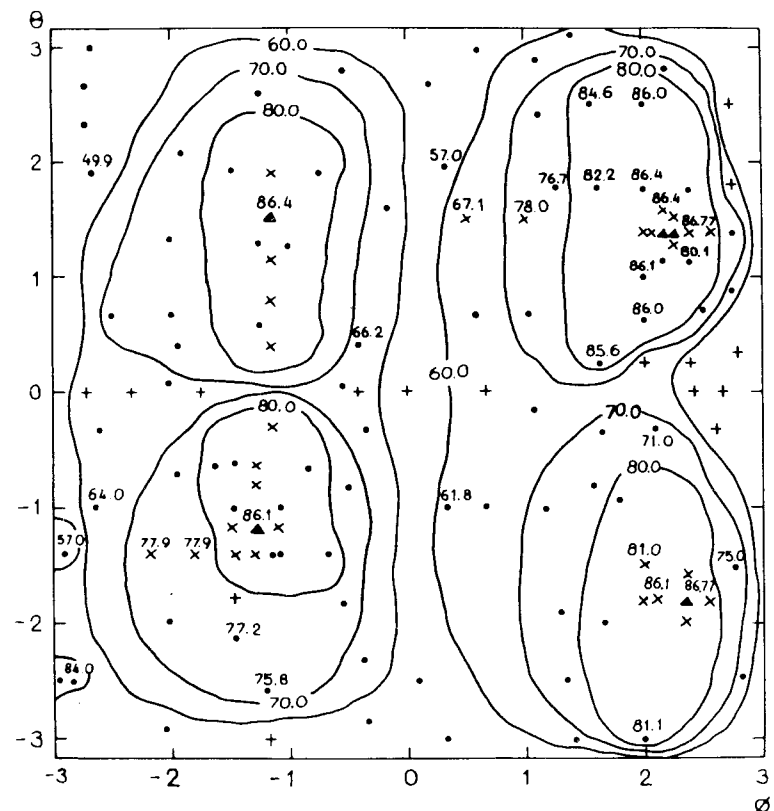


Рис. 2. Топография среднего выгорания топлива - AB в полярных координатах. ● - точки выбраны случайным образом, × - точки получены методом восхождения, ▲ - полученные экстремумы, + - точки запрещенных стратегий перегрузок, - - линия одинакового уровня поверхности $AB(\phi, \theta)$; указанные величины даны в единицах 10 000 МВт дн/тп.

ления, и ограничения обычно нарушаются. Похожие результаты получили в своей работе Wall и Fenech^{/5/} при помощи динамического программирования, хотя в нашем случае для \bar{W}_{opt} не получился равновесный цикл пере-

Таблица 3

Среднее выгорание (AB) урана-235 в зависимости от последовательности вариантов перегрузки и вектора весов \bar{W} . Ограничения - PPFMAX - 2,8 МВт·дн/т, DSBRMAX - 100 000 МВт·дн/т, период оптимизации - 3000 дн, период перегрузок - 500 дн.

\bar{W}			AB (МВт·дн/т)	Последовательность вариантов перегрузки		
ω_1	ω_2	ω_3				
-0.112	0.834	0.540	86,100	I, F, 2; 2, F, I; 2, F, I; 3, F, 2; I, F, 2		
-0.130	0.972	0.195				
-0.221	0.956	0.195				
-0.292	0.800	0.374				
-0.358	0.813	0.4592				
-0.386	0.877	0.2855				
-0.395	0.898	0.195				
-0.410	0.7351	0.540				
-0.477	0.857	0.195				
0.369	-0.838	0.403				
0.380	-0.854	-0.3291				
0.492	-0.841	-0.227				
0.513	-0.799	0.315			86,300	2, F, I; 3, F, 2; 3, F, 2; I, F, 2; I, F, 2
-0.229	0.689	0.688			86,400	I, F, 3; 2, F, I; 2, F, I; 3, F, 2; 2, F, I
0.299	-0.901	0.315				
0.369	-0.838	0.403				
0.403	-0.915	0.039				
-0.292	0.800	0.374	86,500	I, F, 2; 2, F, I; 2, F, I; 2, F, 2; 2, F, I		
-0.700	0.680	0.19	86,710	2, F, I; 2, F, I; I, F, 2; 3, F, 2; I, F, 2		
-0.560	0.800	0.19	86,770	I, F, 2; 2, F, I; I, F, 2; 3, F, 2; I, F, 2		
0.684	-0.693	-0.227	86,770			
			оптимальное решение			
0.539	0.840	0.0407	77,900	F, 2, I; F, F, I; (F, 2, I; F, F, I)		
0.235	0.952	0.195	77,900		Равновесный цикл	

грузок*). Причиной этого является, по-видимому, слишком короткий период оптимизации / Wall и Fenecch достигали равновесного цикла после 6+10 точек перегрузки/ или цикл действительно является неравновесным.

Равновесный цикл можно просто заметить для "худших" величин AB, например, для стратегии, при которой

* Реактор достигает равновесного цикла, если все характеристики его работы равны или очень похожи для нескольких циклов.

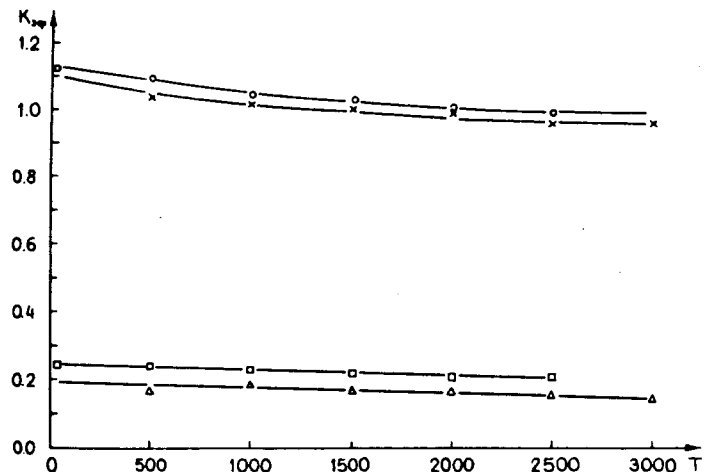


Рис. 3. Максимальный и минимальный $K_{эфф}$ для оптимального цикла перегрузок. $\circ-\circ$ - максимальный $K_{эфф}$ после перегрузки, $\times-\times$ - максимальный $K_{эфф}$ до перегрузки, $\square-\square$ - минимальный $K_{эфф}$ после перегрузки, $\Delta-\Delta$ - минимальный $K_{эфф}$ до перегрузки.

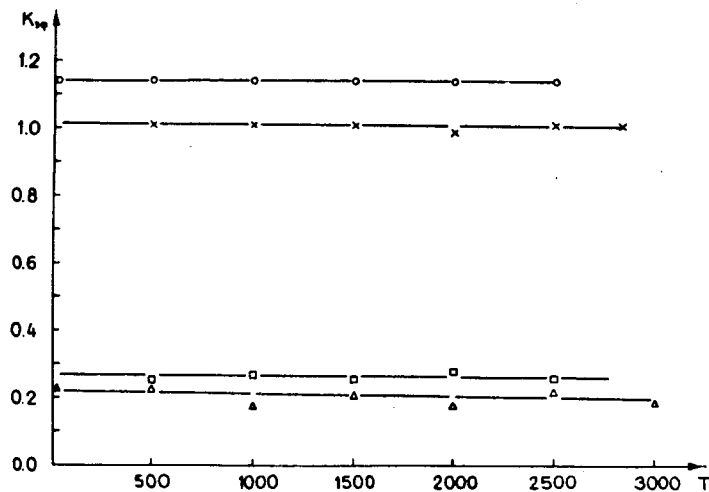


Рис. 4. Максимальный и минимальный $K_{эфф}$ для равновесного цикла перегрузок. $\circ-\circ$ - максимальный $K_{эфф}$ после перегрузки, $\times-\times$ - максимальный $K_{эфф}$ до перегрузки, $\square-\square$ - минимальный $K_{эфф}$ после перегрузки, $\Delta-\Delta$ - минимальный $K_{эфф}$ до перегрузки.

$AB = 77900 \text{ МВт} \cdot \text{дн/тт} / \text{табл. 3/}$. В этой стратегии использованы только 2 типа и два варианта перегрузок - FSS и FFS = (F, 2, 1; F, F, 1).

Интересно сравнить некоторые параметры для оптимальной и равновесной стратегии перегрузок. На рис. 3 и 4 показано изменение максимального и минимального $K_{эфф}$ непосредственно перед перегрузками и после них. Для равновесного цикла в любом состоянии разница между значениями $K_{эфф}$ до и после перегрузок большая по сравнению с оптимальным циклом. Для оптимальной стратегии можно заметить тенденцию к уменьшению $K_{эфф}$ в состоянии "B₀L", хотя короткий период оптимизации не позволяет определить конкретный вид этих изменений.

Точный анализ проблемы может быть полезным для формулировки новых эвристических признаков и решения оптимизационных задач с поглотителем.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты этой работы подтверждают постулаты работы Hoshino/9/ о том, что "многоэтажный" процесс решения можно разложить на индивидуальные решения, зависящие только от текущего состояния процесса. "Вес" эвристических признаков можно рассматривать как независимые параметры во время оптимизационного периода.

2. Для определенных условий работы /см. табл. 1/ оптимальную стратегию перегрузок дает только вид перегрузок SFS.

3. Дальнейшие усилия должны быть направлены на:
а/ увеличение периода оптимизации и исследование зависимости оптимальной стратегии от различных условий работы реактора;

б/ увеличение числа подзон в активной зоне реактора;

в/ включение в оптимизационные расчеты стоимости Th-232 и оптимизацию с учетом поглотителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stout R.B., Robinson A.H. *Nucl. Technology*, 1973, p.20.
2. Markl H. *Nukleonik*, 1967, p.10.
3. Finemann H., Gutgesell W., Markl H. *Nukleonik*, 1969, p.12.
4. Nelson P., Young G. *Journal of Optimization Theory, application*, 1968, p.2.
5. Wall I., Fenech H. *Nuclear Science and Engineering*, 1965, p.22.
6. Sauer T.O. *Nuclear Science and Engineering*, 1971, p.46.
7. Савандер В.И., Иваненков Г.В. *Физика ядерных реакторов*. Атомиздат, М., 1973.
8. Melicé M. *Nuclear Science and Engineering*, 1969, p.37.
9. Hoshino T. *Nuclear Science and Engineering*, 1972, p.49.
10. Nilson N.J. *Information Processing 74 North-Holland Publishing Company*, 1974.
11. Feigenbaum E.A., Feldman J. *Computers and Thought*, McGraw-Hill, 1963.
12. Toat F. *Raport of General Stomics - GA 2749*, 1962.
13. Toat F. *Raport of General Stomics - GA 6612*, 1965.
14. Bennet L.L., Lane R.K. *Fuel Management Flexibilities of the ²³²Th-²³⁵U Cycle*. ANS Topical Meeting On Gas Gas Cooled Reactors - HTGR and GCFBR, 1974.
15. Yames F. *Function Minimization*. CERN 72-21, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 июля 1978 года.