

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

УДК 621.039.51.12

ДВУХЭТАПНЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

© 2022 г. А. М. Кузьмин*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409 Россия

*E-mail: AMKuzmin@mephi.ru

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

После доработки 25.04.2021 г.

Принята к публикации 11.08.2021 г.

Предлагается двухэтапный метод управления органами регулирования в процессе выгорания топлива в течение одной кампании. На первом этапе минимизируется коэффициент неравномерности тепловыделения в начальный момент времени, на втором — критерий неустойчивости в течение заданного временного интервала. Считается, что линейная интерполяция потока нейтронов, построенная на основе методов теории возмущений, позволит без больших вычислительных затрат повысить точность расчета.

Ключевые слова: органы регулирования, поток нейтронов, выгорание топлива, коэффициент неравномерности тепловыделения

DOI: 10.56304/S2079562922010249

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное изменение изотопного состава топлива в процессе работы ядерного реактора приводит к изменениям со временем t эффективного коэффициента размножения нейтронов $k_{\text{ef}}(t)$, реактивности $\rho(t)$ и распределения удельного тепловыделения $q(\mathbf{r}, t)$. Восстановление критичности реактора осуществляется за счет механического перемещения органов регулирования (компенсаторов запаса реактивности), также влияющих на распределение $q(\mathbf{r}, t)$.

Из-за изменения $q(\mathbf{r}, t)$ со временем приходится при определении расхода теплоносителя ориентироваться на распределение $\tilde{q}(\mathbf{r}) = \max_{t \in T} q(\mathbf{r}, t)$, что влечет за собой снижение температуры теплоносителя на выходе из активной зоны и уменьшение коэффициента полезного действия станции. При определении максимальных температур в твэлах выбираются значения $\tilde{q}^{(\max)} = \max_{\mathbf{r} \in V} \tilde{q}(\mathbf{r})$, что в присутствии ограничения на значение $\tilde{q}^{(\max)}$ может привести к снижению тепловой мощности. В результате приходится вводить запасы на максимальные температуры теплоносителя, топлива и оболочки тепловыделяющих элементов (твэлов), что приводит к снижению выработанной в объеме V за время кампании реактора T энергии. Поэтому важно найти такой способ управления ком-

пенсаторами запаса реактивности, который не приводил к большим искажениям распределения $q(\mathbf{r}, t)$ в процессе работы реактора.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРА

Управление полем удельного тепловыделения рассматривается для многозонной модели быстрого реактора БН-1200 [1]. Модель состоит из I_f топливных каналов и I_r каналов с регуляторами, содержащими поглощающие нейтроны элементы. Топливный канал может включать несколько ТВС с близкими свойствами. В пределах одного регулирующего канала поглощающие элементы перемещаются в аксиальном направлении синхронно, а в разных каналах — независимо, замещая теплоноситель. В обоих случаях со временем изменяется глубина погружения $h_i(t)$ регулятора с номером $i \in I_r$ в активную зону.

Каждая зона (i, k) выбранной модели представляет собой гомогенную смесь материалов, принадлежащих объему $V_{i,k}$, который располагается в слое толщиной $\Delta H_k = H_k - H_{k-1}$ ($k = 1, 2, \dots$), ограниченным вдоль оси z плоскостями $z = H_k$, $z = H_{k-1}$. Объемные доли $\varepsilon_{i,k}^{(l)}$ материалов сорта l в каналах $i \in I_f$ со временем не меняются, а в каналах $i \in I_r$ меняется соотношение между долями поглотите-

ля $\varepsilon_{i,k}^{(n)}(t)$ и теплоносителя $\varepsilon_{i,k}^{(тн)}(t)$ так, что сохраняется их сумма.

Считается, что в процессе работы свойства реактора меняются достаточно медленно. Поэтому зависимость потока нейтронов $\Phi(x, t)$ от пространственно-энергетических переменных $x = (r, E)$ и времени t можно представить в виде [2]

$$\Phi(x, t) = A(t)\varphi(x, t), \quad (1)$$

где $\varphi(x, t)$ — собственная функция условно-критической задачи, соответствующая ведущему собственному числу $k_{эфф}(t)$, а множитель $A(t)$ определяется, используя условие нормировки потока нейтронов (например, на известное допустимое значение $q^{(доп)}$ максимального тепловыделения).

Функция $\varphi(x, t)$ принадлежит известному в каждой задаче множеству Ω и находится, решая уравнение

$$-\hat{L}(t)\varphi(x, t) + \lambda(t)\hat{Q}(t)\varphi(x, t) = 0, \quad \varphi(x, t) \in \Omega, \quad (2)$$

где $\lambda(t) = k_{эфф}^{-1}(t)$, а операторы $\hat{L}(t)$, $\hat{Q}(t)$, зависящие от средних по объему зоны концентраций $C_{i,k}^{(l)}(t)$ ядер сорта l , описывают: $\hat{L}(t)$ — перенос, поглощение и замедление нейтронов, а $\hat{Q}(t)$ — возникновение нейтронов за счет деления тяжелых ядер среды. При этом средние значения $C_{i,k}^{(l)}(t)$ в зонах однозначно связаны с концентрациями ядер $N_{i,k}^{(l)}(t)$ в единице объема топлива или поглотителя, а в зонах канала $i \in I_r$ — также с глубиной погружения $h_i(t)$ регуляторов.

Значения $N_{i,k}^{(l)}(t)$ получают, решая уравнения выгорания [3] вида (для вектора $\mathbf{N}_{i,k}(t)$ с компонентами $N_{i,k}^{(l)}(t)$)

$$\frac{d\mathbf{N}_{i,k}(t)}{dt} = \hat{M}(\bar{\Phi}_{i,k})\mathbf{N}_{i,k}(t) \quad (3)$$

при известном начальном условии $\mathbf{N}_{i,k}(t_0) = \mathbf{N}_{i,k}^{(0)}$. Здесь $\bar{\Phi}_{i,k}$ — средний по объему зоны (i, k) поток нейтронов в момент времени t , а $\hat{M}(\bar{\Phi}_{i,k})$ — матрица выгорания с элементами, зависящими от усредненных по потокам микроскопических сечений.

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ

Уравнения (1)–(3) описывают процесс выгорания топлива и поглотителей. Они образуют нелинейную систему, которая обычно решается при заданном способе управления компенсаторами запаса реактивности, придерживаясь следующей последовательности вычислений [3].

Время кампании реактора T разбивается на интервалы $\Delta t_j = t_j - t_{j-1}$, $(j = 1, 2, \dots)$, $\sum_j \Delta t_j = T$. На каждом шаге Δt_j при известных значениях $N_{i,k}^{(l)}(t_{j-1})$ рассчитываются средние по объему каждой зоны концентрации $C_{i,k}^{(l)}(t_{j-1})$ и решаются уравнения (2), выполняя условие критичности реактора в момент времени $t = t_{j-1}$ за счет изменения значений $h_i(t_{j-1})$. На основе найденного распределения $\Phi(x, t_{j-1})$ оцениваются средние потоки $\bar{\Phi}_{i,k}(t_{j-1})$. Затем интегрируются уравнения (3), предполагая, что $\bar{\Phi}_{i,k}(t) = \bar{\Phi}_{i,k}(t_{j-1})$ при $t \in \Delta t_j$. В результате определяются концентрации $N_{i,k}^{(l)}(t)$, а значения $N_{i,k}^{(l)}(t_j)$ рассматриваются как начальные концентрации при выполнении расчетов на следующем шаге Δt_j .

При оценке изменения физических характеристик реактора часто выбирают достаточно простые способы управления. Например, в работе [4] при рассмотрении равномерно — частичных перегрузок топлива принято, что компенсаторы равномерно размещаются по активной зоне, а перемещаются в направлении аксиальной оси z с одной и той же скоростью $\vartheta(t)$. В условиях неравномерного выгорания топлива такой способ может привести к дополнительному искажению распределения $q(r, t)$ со временем. Сохраняя возможность выравнивания $q(r, t)$ в процессе работы реактора, будем считать, что поглотители в различных регулирующих каналах двигаются независимо друг от друга с различными скоростями $\vartheta_i(t)$. В таком случае глубину погружения $h_i(t)$ можно представить в виде

$$h_i(t) = h_i(t_{j-1}) + \int_{t_{j-1}}^t \vartheta_i(t') dt', \quad t \in \Delta t_j, \quad i \in I_r. \quad (4)$$

Параметры $h_i(t_{j-1})$ и зависимости $\vartheta_i(t)$ будем рассматривать как независимые управления. Значения их определим, считая, что целью управления является повышение количества энергии ω_j , выработанной за время Δt_j при выполнении требований, обеспечивающих безопасную эксплуатацию установок. Из числа таких требований ограничимся выполнением условий:

$$\begin{aligned} k_{эфф}(t) &= 1, \quad \max_{r \in V} q(r, t) \leq q^{(доп)}, \\ 0 \leq h_i(t) &\leq h_i^{(доп)}, \quad i \in I_r, \quad t \in \Delta t_j, \end{aligned} \quad (5)$$

где $q^{(доп)}$, $h_i^{(доп)}$ — заданные допустимые значения.

Значения ω_j не удастся рассчитать, оставаясь в рамках выбранной расчетной модели. В связи с этим для оценки качества управления введем в

рассмотрение следующие функционалы, определенные на решениях уравнений (1)–(3):

– коэффициент неравномерности распределения $q(\mathbf{r}, t)$ в момент времени t

$$F_v(t) = \frac{V}{W(t)} \max_{\mathbf{r} \in V} q(\mathbf{r}, t), \quad t \in \Delta t_j, \quad (6)$$

– критерий неустойчивости изменения $q(\mathbf{r}, t)$ в течение $t \in \Delta t_j$

$$F_s = \frac{1}{\Delta t_j} \int_{\Delta t_j} \int_{\mathbf{r} \in V} \left(\frac{q(\mathbf{r}, t)}{W(t)} - \frac{q(\mathbf{r}, t_{j-1})}{W(t_{j-1})} \right)^2 dV dt, \quad (7)$$

где $W(t) = \int_{\mathbf{r} \in V} q(\mathbf{r}, t) dV$ – мощность реактора.

Видно, что в присутствии ограничения (5) на $q(\mathbf{r}, t)$ и значениях $q(\mathbf{r}, t)$, слабо меняющихся в течение времени $t \in \Delta t_j$,

$$\omega_j = \int_{\Delta t_j} W(t) - dt \leq q^{(\text{доп})} V \times \\ \times \int_{\Delta t_j} \frac{dt}{F_v(t)} \approx q^{(\text{доп})} V \Delta t_j \frac{1}{F_v(t_{j-1})}.$$

Таким образом, выравнивание и повышение стабильности распределения $q(\mathbf{r}, t)$ способствуют увеличению ω_j . Поэтому неизвестные значения параметров $h_i(t_{j-1})$ и зависимости $\vartheta_i(t)$ в каналах с номерами $i \in I_r$ можно искать, решая на каждом интервале Δt_j последовательно, начиная с Δt_1 , двухкритериальную задачу оптимального управления:

$$\min F_v(t_{j-1}), \quad \min F_s \quad (8)$$

при условиях (4), (5) и значениях функционалов, определенных на решениях уравнений (1)–(3).

МЕТОД ДВУХЭТАПНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Оптимизационная задача (8) относится к числу многокритериальных (с неопределенными целями) задач. Решения их находят, используя дополнительные гипотезы, не вытекающие из постановки задачи. Наибольшее распространение получили компромиссы Парето и линейной свертки критериев [5]. В первом случае определяется множество альтернативных решений, не улучшаемых одновременно по всем критериям, а во втором – знать коэффициенты “важности” критериев, задаваемых обычно на основе субъективных экспертных оценок. Это затрудняет применение таких способов в задачах управления, рассматриваемых последовательно на разных временных интервалах.

В частном случае двухкритериальной задачи вполне определенное решение дает метод двухэтапной оптимизации [5]. Воспользуемся им,

приняв во внимание, что выгорание топлива в ядерных реакторах относится к медленно протекающим процессам. Поэтому можно принять, что значения $\vartheta_i(t)$ при $t \in \Delta t_j$ слабо отличаются от

среднего значения $\vartheta_i^{(j)}$ и рассматривать второе слагаемое в формуле (4) как слабое возмущение свойств реактора. В результате приходим к задаче с неизвестными параметрами $h_i(t_{j-1})$, $\vartheta_i^{(j)}$ $i \in I_r$, наилучшие значения которых получим, решая на каждом шаге Δt_j последовательно две оптимизационные задачи:

– сначала определяя значения $\tilde{h}_i(t_{j-1})$ $i \in I_r$, при которых функционал $F_v(t_{j-1})$ достигает минимума при условиях (4), (5),

– затем получая значения $\tilde{\vartheta}_i^{(j)}$ $i \in I_r$, при которых функционал F_s достигает минимума при условиях (4), (5) и значениях $h_i(t_{j-1}) = \tilde{h}_i(t_{j-1})$.

Допускается выбор вместо $F_v(t_{j-1})$ иных функционалов и включение в число условий (5) ограничений на другие характеристики реактора, определенные на решениях уравнений (1)–(3).

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА

Наиболее трудоемкой частью метода является решение однокритериальных задач (8). Каждая из них может быть решена, используя известные итерационные методы оптимизации [6]. Например, метод линеаризации, в котором на каждой итерации рассчитываются коэффициенты чувствительности функционалов, а затем в небольшой окрестности текущих значений неизвестных параметров (h_i или ϑ_i) решается задача линейного (или квадратичного) программирования. Рассматривая особенности такого рода методов, обратим внимание на следующие моменты.

В число условий (5) входит ограничение на функцию $q(\mathbf{r}, t)$. Чтобы в процессе минимизации функционалов выполнялось такое ограничение, приходится следить за значениями функции в тех точках $\mathbf{r}_l$ ($l = 1, 2, \dots, l_s$), в которых значения $q(\mathbf{r}_l, t)$ мало отличаются от допустимого значения $q^{(\text{доп})}$.

В результате общее число ограничений на функционалы значительно возрастет и превысит число независимых переменных $h_i(t_{j-1})$. В таком случае более эффективным станет получение коэффициентов чувствительности с использованием функций влияния (а не сопряженных уравнений для ценностей нейтронов) [7]:

$$\psi_i(x, t_{j-1}) = \frac{\partial \Phi(x, t)}{\partial h_i(t_{j-1})}.$$

В работе [8] показано, что их общее количество совпадает с общим числом независимых параметров $h_i(t_{j-1})$, $i = 1, 2, \dots, m$.

При небольшой величине шага Δt_j и слабом изменении свойств реактора в процессе выгорания топлива можно ограничиться линейными по t зависимостями потока нейтронов и функционалов задачи. При этом коэффициенты являются линейными функциями неизвестных параметров $\vartheta_i^{(j)}$. В результате поиск минимума F_s происходит в результате решения задачи квадратичного программирования: поиска минимума квадратичной формы (относительно переменных $\vartheta_i^{(j)}$) при линейных ограничениях. Коэффициенты рассчитываются, используя те же функции влияния, что и при минимизации функционала F_v . Решение подобной задачи не требует больших вычислительных затрат и находится за конечное число итераций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый в работе метод управления распределением тепловыделения может найти применение при расчетных исследованиях реакторов с небольшим запасом реактивности на выгорание топлива. К числу таких установок относятся энер-

гетические быстрые реакторы, в которых коэффициент воспроизводства активной зоны мало отличается от единицы. В этом случае число функций влияния и, следовательно, вычислительные затраты для их получения будут не столь большими, как в реакторах с большим числом органов регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Рачков В.И., Поплавский В.М., Цибуля А.М. и др. // Атомная энергия. 2010. Т. 108. № 4. С. 201–206.
2. Chermak J., Matveev V.I. // Jad. Energ. 1985.V. 31. P. 143–148.
3. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. 1974. Москва: Атомиздат.
4. Матвеев В.И., Хомяков Ю.С. Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. 2012. Москва: Издательский дом МЭИ.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. 1981. Москва: Наука.
6. Марчук Г.И. Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. 1992. Москва: Физматлит.
7. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. 2005. Москва: Физматлит.
8. Кузьмин А.М. // Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 1. С. 3–9.

Two-Stage Technique of Controlling the Heat Release Distribution

A. M. Kuzmin*

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: AMKuzmin@mephi.ru

Received March 23, 2021; revised April 25, 2021; accepted August 11, 2021

Abstract—A two-stage method is proposed for controlling the regulators in the fuel burnup process during a single operating period. At the first stage, the coefficient of the heat release irregularity at the initial time moment is minimized; at the second stage, the instability criterion for a specified time interval is minimized. The linear interpolation of the neutron flux constructed on the basis of perturbation theory is considered to improve the calculation accuracy without high computational costs.

Keywords: regulation, neutron flux, fuel burnup, heat release unevenness coefficient