

# Простейшая математическая модель для исследования динамики водо-водяных реакторов в режиме саморегулирования

Ф. М. МИТЕНКОВ, Б. И. МОТОРОВ, Э. А. МОТОРОВА

УДК 621.039.514

Обосновывается математическая модель для исследования устойчивости изолированного реактора в режиме саморегулирования, сформулированная следующим образом:

$$\frac{l}{\beta} \cdot \frac{d\Delta n}{dt} - \frac{n_0}{\beta} \Delta \rho + \Delta n - \frac{\lambda l}{\beta} \Delta c = 0;$$

$$l \frac{d\Delta c}{dt} - \beta \Delta n + \lambda l \Delta c = 0;$$

$$\Delta \rho = \alpha_B \Delta \theta + \alpha_{\text{МКП}} \Delta \theta_{\text{МКП}} + \alpha_r \Delta \theta_r;$$

$$m_r c_r \frac{d\Delta \theta_r}{dt} = A_1 \Delta n - k_1 (\Delta \theta_r - \Delta \theta);$$

$$m_B c_B \frac{d\Delta \theta}{dt} = k_1 (\Delta \theta_r - \Delta \theta) - 2G c_B \Delta \theta;$$

$$m_{\text{МКП}} c_{\text{МКП}} \frac{d\Delta \theta_{\text{МКП}}}{dt} = A_2 \Delta n - 2G_{\text{МКП}} c_{\text{МКП}} \Delta \theta_{\text{МКП}}.$$

Здесь  $n$  — относительная плотность нейтронов в реакторе;  $\rho$  — реактивность;  $\beta$  — суммарная доля запаздывающих нейтронов;  $c$  — концентрация излучателей запаздывающих нейтронов при одной эффективной группе;  $l$  — время жизни мгновенных нейтронов;  $\lambda$  — постоянная распада одной эффективной группы запаздывающих нейтронов;  $\alpha_r$ ,  $\alpha_B$ ,  $\alpha_{\text{МКП}}$  — средние температурные коэффициенты реактивности горючего и теплоносителя в каналах реактора и воде межканального пространства (МКП);  $k_1$  — средний по длине канала коэффициент теплопередачи от горючего к теплоносителю;  $A_1 n$ ,  $A_2 n$  — мощность, выделяющаяся в каналах и МКП соответственно;  $G$ ,  $G_{\text{МКП}}$  — расход теплоносителя в каналах и МКП;  $m_r$ ,  $m_B$ ,  $m_{\text{МКП}}$  — масса горючего и теплоносителя в каналах и МКП;  $c_r$ ,  $c_B$ ,  $c_{\text{МКП}}$  — теплоемкость горючего и теплоносителя в каналах и МКП;  $\theta_r$ ,  $\theta$ ,  $\theta_{\text{МКП}}$  — средние температуры горючего и теплоносителя в каналах и МКП.

Эта модель может быть использована для исследования динамики реактора в области достаточно высоких частот, поскольку постоянные времени, характеризующие процессы теплообмена в активной зоне, как правило, значительно меньше периода циркуляции теплоносителя. Для обоснования указанной модели анализируется влияние следующих факторов: нали-

чия МКП, различного числа групп запаздывающих нейтронов, времени жизни мгновенных нейтронов, распределенности параметров по длине канала, температурного эффекта реактивности горючего, нелинейности уравнений кинетики, тепловой инерции оболочки твэлов.

Система, описываемая моделью, в которой не учтено влияние перечисленных факторов, устойчива при любом отрицательном температурном коэффициенте реактивности, если хотя бы одна из постоянных времени (горючего или теплоносителя) меньше  $1/\lambda$ , что практически всегда выполняется. Таким образом, такая модель даже качественно является грубой из-за недопустимого занижения фазовых сдвигов в контуре обратной связи.

Учет МКП, стабилизирующего систему, не увеличивает фазового сдвига в контуре. Аналогичный вывод делается и по отношению к числу групп запаздывающих нейтронов на основании сравнения амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик уравнений кинетики.

Более серьезным является пренебрежение временем жизни мгновенных нейтронов: учет постоянной времени  $l/\beta$  существенно меняет положение границы области устойчивости по температурному коэффициенту реактивности.

При учете пространственной распределенности параметров системы теплообмен в горючем и теплоносителе описывается уравнениями в частных производных с последующим анализом трансцендентных коэффициентов передачи. В исследуемой области частот погрешность передачи фазового сдвига дискретной модели как для равномерного, так и для синусоидального распределения энерговыделения по длине канала незначительна.

Положительный температурный коэффициент реактивности горючего при определяющей роли отрицательной обратной связи (с большим, чем у горючего, фазовым запаздыванием) заметно увеличивает фазовый сдвиг результирующей обратной связи.

Учет тепловой инерции оболочки твэлов и нелинейности уравнений кинетики при амплитуде синусоидального возмущения реактивности, не превышающей  $0,1\beta$ , приводит к незначительному изменению фазового сдвига в системе.

(№ 111/3464. Статья поступила в Редакцию 24/IX 1965 г., аннотация — 8/IX 1966 г. Полный текст 0,65 а. л., 6 рис., библиография 4 названия.)