

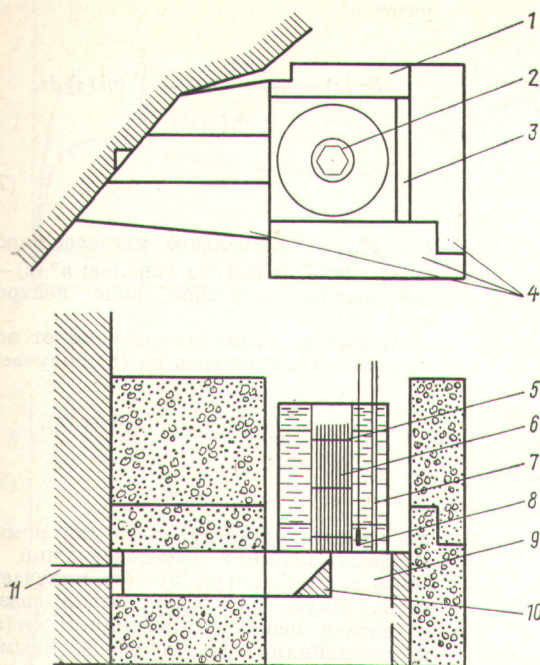


Схема экспериментальной установки:

1 — защитная стенка из парафина; 2 — $\text{UO}_2\text{—H}_2\text{O}$ -сборка; 3 — защитная стенка из свинца; 4 — защитные блоки из бетона; 5 — дистанционирующие решетки; 6 — UO_2 -твэлы; 7 — канал для монитора; 8 — BF_3 -счетчик; 9 — графитовая призма; 10 — рассеиватель; 11 — ГЭК ИРТ МИФИ

При облучении в кадмиевом чехле использовали кадмиевые фильтры толщиной 500 мкм. От экспериментальных образцов кадмиевые фильтры отделяли топ-

ливными таблетками из двуокиси урана толщиной 5 мм. Скорость деления тепловыми и надкадмиевыми нейтронами определяли по интенсивности γ -излучения изотопа ^{143}Ce . «Взвешивание» образцов осуществлялось по интенсивности γ -излучения ^{235}U с $E_\gamma = 185,72$ кэВ.

Функционал $\frac{\langle \sigma_c^{28} \rangle}{\langle \sigma_f^{25} \rangle}$ измеряли путем сравнения интенсивностей γ -излучения изотопов ^{239}Np ($E_\gamma = 277,6$ кэВ) и ^{143}Ce ($E_\gamma = 293,26$ кэВ) в образце, изготовленном из двуокиси урана с обогащением 6,5% по ^{235}U , толщиной 500 мкм и диаметром 7,65 мм. Для определения отношения эффективности регистрации γ -квантов этих энергий $\left(\frac{a_{\gamma}^{293,26}}{a_{\gamma}^{277,6}} \right)$ проводили калибровку образцов в тепловой колонне. Время облучения в ней соответствовало времени облучения в $\text{UO}_2\text{—H}_2\text{O}$ подкритической сборке. Сечения σ_c^{28} и σ_f^{25} в тепловой области были приняты равными $\sigma_c^{28} = 2,73 \pm 0,04$ б, $\sigma_f^{25} = 580,2 \pm 1,8$ б [2, 3].

В результате измерений были получены следующие значения: $\delta^{28} = 0,0537 \pm 0,0015$; $\delta^{25} = 0,266 \pm 0,006$; $\frac{\langle \sigma_c^{28} \rangle}{\langle \sigma_f^{25} \rangle} = 0,0239 \pm 0,0011$.

Поступило в Редакцию 4/VII/1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрова Л. Н. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 4, с. 279.
2. Neutron Cross Sections. BNL-325, 1973.
3. In: Proc. IAEA Symp. «Nucl. Data for Reactors». Helsinki, 1970, p. 134, 287.

УДК 621.039.515

Трехмерное аналоговое моделирование реактора с учетом теплопереноса

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ФИЛИПЧУК Е. В., ПОТАПЕНКО П. Т., КРЫЛОВ В. М.

Математическая модель реактора в задачах регулирования может базироваться на одгрупповом диффузионном приближении*:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_\infty - 1}{\tau} n + \frac{M^2}{r} \nabla^2 n - \sum_{i=1}^6 \frac{dC_i}{dt}; \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k_\infty \beta_i}{r} n - \lambda_i C_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (2)$$

Здесь n — плотность нейтронного потока; k_∞ — коэффициент размножения; τ — время жизни нейтронов; C_i ,

β_i , λ_i — концентрация, доли и постоянные распада источников запаздывающих нейтронов; M^2 — площадь миграции.

Локальное изменение коэффициента размножения Δk представляется в виде

$$\Delta k = \delta k + \delta k_T + \delta k_p, \quad (3)$$

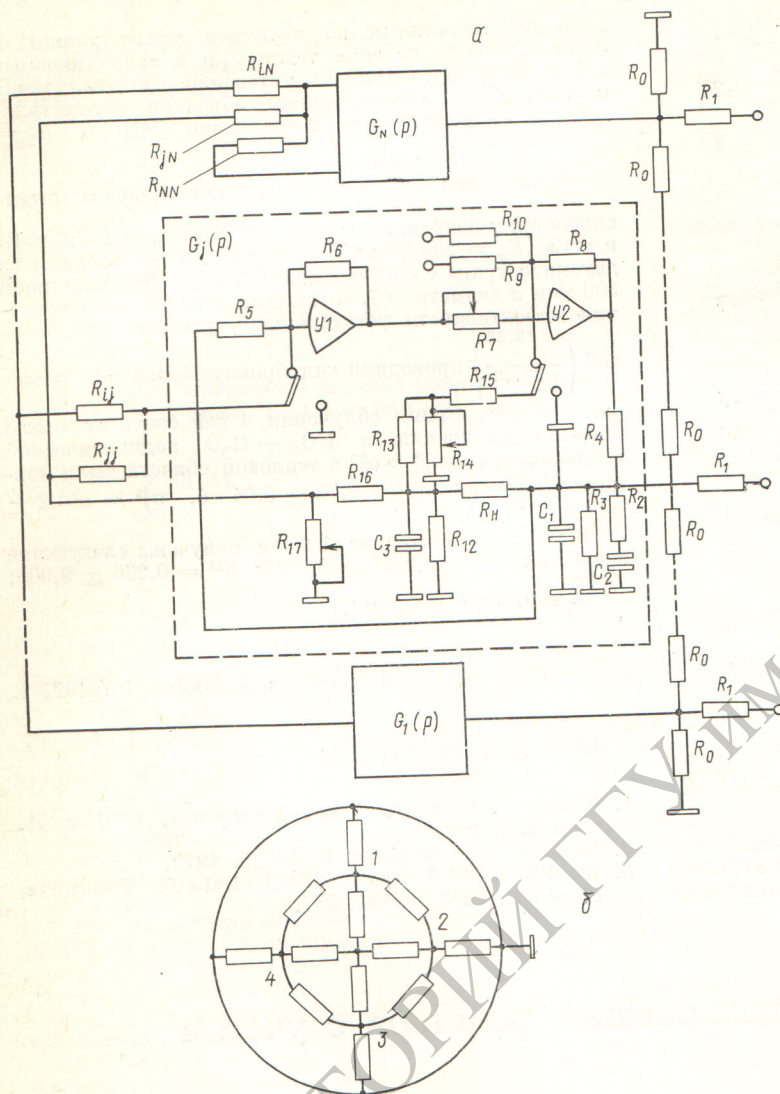
где δk — внешнее воздействие (регулирующие стержни и внешние возмущения k_∞); δk_T — эффект изменения k_∞ вследствие изменения температуры топлива (доплер-эффект); δk_p — локальное изменение k_∞ вследствие изменения объемного паросодержания ф.

Уравнение для изменения δk_T представляется в виде

$$\tau_p \frac{d\delta k_T}{dt} + \delta k_T = K_T \delta n, \quad (4)$$

где δn — локальное отклонение плотности нейтронного потока; τ_p — постоянная времени топлива; K_T — отрицательный коэффициент обратной связи по топливу.

* Потапенко П. Т., Винтизенко И. Т., Косилов А. Н. В кн.: Аналоговая и аналого-цифровая вычислительная техника. Вып. 6. М., «Сов. радио», 1973, с. 102.



Р и с. 1. Трехмерная аналоговая модель: схема одного канала (а), схема резистивной сетки одного этажа модели (б)

Уравнение для изменений δk_{Π} :

$$\delta k_{\Pi} = K_{\Phi} \delta \varphi, \quad (5)$$

где $\delta \varphi$ — локальное отклонение объемного паросодержания от стационарного значения; K_{Φ} — положительный коэффициент обратной связи по паросодержанию. Связь объемного φ и массового x паросодержаний нелинейна и выражается соотношением

$$\varphi = \frac{x}{x + \gamma_0(2-x)} = F(x), \quad (6)$$

где γ_0 — плотность насыщенного пара (относительно воды).

Изменение массового паросодержания по высоте δx относительно номинального распределения связано с отклонением нейтронного поля от базового значения на предшествующем (по ходу теплоносителя)

участке

$$\delta x(z) = \frac{x_{\text{ВЫХ}}^*}{H \int_0^z n^*(z) dz} \int_0^z \delta n(z) dz, \quad (7)$$

где $x_{\text{ВЫХ}}^*$ — номинальное массовое паросодержание на выходе каналов; $n^*(z)$ — номинальное высотное поле нейтронов.

С учетом малых отклонений от номинальных параметров из (6) получаем

$$\delta \varphi(z) = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \delta x(z) = F'(z) \delta x(z), \quad (8)$$

где производная $F'(z)$ взята для номинальных значений паросодержаний в точке z . Комбинируя (5) — (8), получаем необходимую для моделирования связь в статике между отклонениями $\delta n(z)$ и изменениями δk_{Π} , обусловленными паровым коэффициентом

$$\delta k_{\Pi} = K_{\Phi} F'(z) \frac{x_{\text{ВЫХ}}^*}{H \int_0^z n^*(z) dz} \int_0^z \delta n(z) dz. \quad (9)$$

Приведенные уравнения приняты в качестве математической модели.

Аналоговая модель реактора содержала 5 идентичных каналов, в радиальном направлении реактор разбивался на центральную зону и 4 квадрата равной площади. По высоте активная зона разбивалась на 8 слоев. Параметры реактора: высота экономайзерного участка 30% высоты H активной зоны; высота выравненной зоны $h = 0,4H$; $M^2 = 550 \text{ см}^2$; $T_T = 15 \text{ с}$, коэффициенты реактивности в модели регулируются в пределах $K_T = -(0-2)\beta$ на 100%-ное изменение мощности и $K_{\Phi} = (0-4)\beta$ на 100%-ное изменение паросодержания. Далее приведены результаты для значений $K_T = -\beta$, $K_{\Phi} = +2\beta$. Аналоговая модель (рис. 1) представляет собой трехмерную резистивную решетку, моделирующую диффузию нейтронов, к узлам которой присоединены операционные усилители, моделирующие приведенные выше уравнения. На рис. 1, а приведен один из пяти каналов модели; в горизонтальном направлении эти каналы соединены семизетажной сеткой из 5 узлов (на каждый узел решетки резисторов обслуживался парой операционных усилителей УУ-2, всего использовалось 70 усилителей. При моделировании интеграл в выражении (9) заменялся соответствующей суммой в модели:

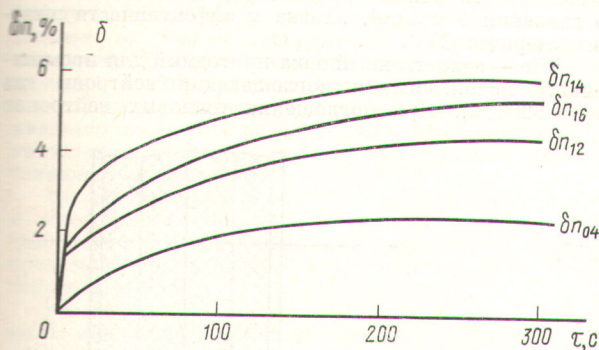
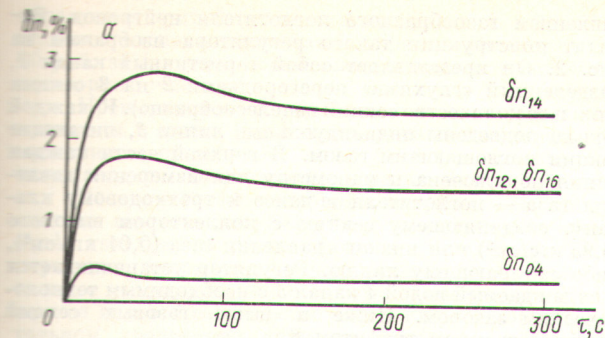


Рис. 2. Переходные процессы в модели при ступенчатом изменении реактивности $\delta k_{14} = 0,2\beta$ для реактора с $\kappa_T = -\beta$, $\kappa_\Phi = 0$ (а) и при $\kappa_T = -\beta$, $\kappa_\Phi = +2\beta$ (б)

на входе усилителя Y-1 суммируются «паровые» вклады от всех ячеек, предшествующих рассматриваемой (по ходу теплоносителя).

Нули напряжений в узлах сетки означают соответствие базовому нейтронному полю.

На аналоговой модели проведено большое количество экспериментов по динамике и статике нейтронного поля. Здесь приведены наиболее характерные результаты. Ячейки модели далее индексируются двумя цифрами, первая из которых является номером канала

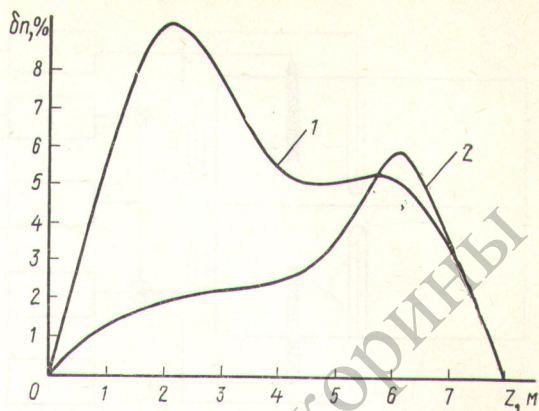


Рис. 3. Статистические распределения отклонения нейтронного поля по высоте в первом канале при $\delta k_{12} = 0,2\beta$ (1) и $\delta k_{16} = 0,2\beta$ (2)

(в соответствии с рис. 1, б), а вторая — номером узла в этом канале, начиная снизу. Так, δk_{14} и δn_{14} означают входные и выходные сигналы для четвертого узла первого канала.

На рис. 2 приведены переходные процессы отклонений нейтронного поля при ступенчатом изменении k_∞ в ячейке 14 на величину $\delta k_{14} = 0,2\beta$ для реактора с $K_T = -\beta$ и $K_\Phi = 0$ (см. рис. 2, а) и с $K_T = -\beta$ и $K_\Phi = +2\beta$ (см. рис. 2, б).

На рис. 3 приведены статические распределения для изменения δk_{12} (1) и δk_{16} (2) на величину $0,2\beta$ ($K_T = -\beta$, $K_\Phi = +2\beta$).

Из рис. 2—3 видно, что положительный паровой коэффициент реактивности не только увеличивает отклонения нейтронного поля в ответ на локальные возмущения реактивности, но и вызывает значительную асимметрию в реакциях верхней и нижней частей активной зоны.

Аналоговая модель позволяет в короткий срок провести обширные исследования по динамике нейтронного поля и систем трехмерного зонного регулирования мощности.

Поступило в Редакцию 26/V 1977 г.

УДК 621.039.562

Трехмерное зонное регулирование мощности реактора

ЕМЕЛЬЯНОВ И. Я., ФИЛИПЧУК Е. В., ПОТАПЕНКО П. Т., КРЫЛОВ В. М.

При нестабильности реактора по отношению к первым азимутальной и высотной гармоникам стабилизация нейтронного поля реактора может быть обеспечена двухъярусной системой регулирования с несколькими зонными регуляторами на верхнем и нижнем ярусах.

Такая система полезна и при устойчивом распределении мощности, так как позволяет уменьшить локальные погрешности регулирования распределения мощности и тем самым увеличить теплотехническую надежность реактора. Так, при форсировании мощностей в реакторах за счет интенсификации теплообмена [1] или других мер в число параметров, лимитирующих

мощность, войдет температура твэлов, их оболочек, замедлителя. В этом случае проблема стабилизации и регулирования высотного распределения мощности становится весьма актуальной.

Однако и в реакторах, где поле нейтронов по высоте практически не лимитирует мощность и не ограничивает теплотехническую надежность, высотные перекосы и нестабильность поля крайне нежелательны. Они вызывают «термокачки», приводящие к преждевременному выходу из строя твэлов, изменяют эффективность стержней, обуславливают изменение мощности реактора автоматическим регулятором (при постоянной