

УДК 621.039.562:621.039.519

К учету времени падения при определении отрицательной реактивности методом сброса стержня

ЕЛОВСКИЙ О. А.

Метод сброса стержня является одним из способов измерения отрицательной реактивности в диапазоне от долей до нескольких единиц $\beta_{эф}$ [1]. Интегральная форма метода (метод интегрального счета [2]) позволяет просто реализовать высокую статистическую точность результатов, не зависящую от величины измеряемой реактивности. В основу метода положено предположение о скачкообразном изменении реактивности в критическом реакторе. Пренебрежение конечным временем падения стержня при интерпретации результатов в методе сброса ведет к систематической ошибке, имеющей заметную величину [3—5]. В рамках точечной модели кинетики реактора возможно при определенных допущениях провести для метода сброса достаточно корректный учет систематической ошибки из-за конечного времени падения стержня. В этом случае изменение плотности нейтронов $n(t)$ при введении реактивности $\rho^*(t)$ в критический реактор описывается известной системой уравнений:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho^*(t) - 1}{\Lambda^*} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t); \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = -\lambda_i C_i(t) + \frac{a_i}{\Lambda^*} n(t), \quad (2)$$

где $\Lambda^* = \frac{\Lambda}{\beta_{эф}}$; $\rho^*(t) = \frac{\rho(t)}{\beta_{эф}}$, остальные обозначения общепринятые.

Интегрирование (1) и (2) при мгновенном введении отрицательной реактивности $\rho^*(t) = -\rho_0^*$ после простых преобразований приводит к выражению, лежащему в основе метода интегрального счета:

$$\rho_0^* = \frac{n(0) \left(\Lambda^* + \sum_{i=1}^6 a_i / \lambda_i \right)}{\int_0^{\infty} n_0(t) dt}, \quad (3)$$

где $n(0)$ — плотность нейтронов в критическом реакторе; ρ_0^* , $n_0(t)$ — здесь и далее относятся к случаю мгновенного введения реактивности.

На практике изменение реактивности происходит за конечное время t_0 по закону, который всецело определяется конструкцией и характеристиками реактора.

В этом случае подсчитанное по формуле (3) значение реактивности ρ_0^* с использованием реального поведения плотности нейтронов $n(t)$ содержит систематическую ошибку.

Несложные преобразования выражения (3) позволяют связать значение реактивности ρ_0^* , получаемое по экспериментальным данным, со значением ρ_0^* . С этой

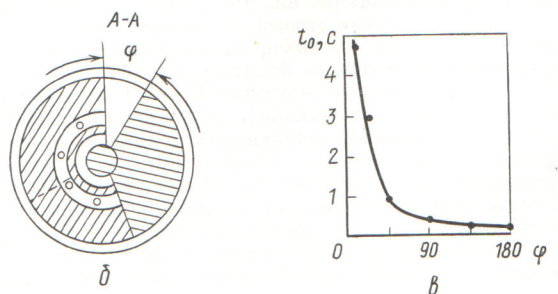
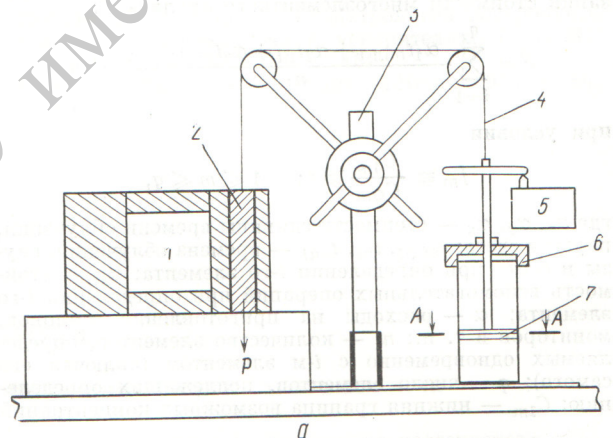
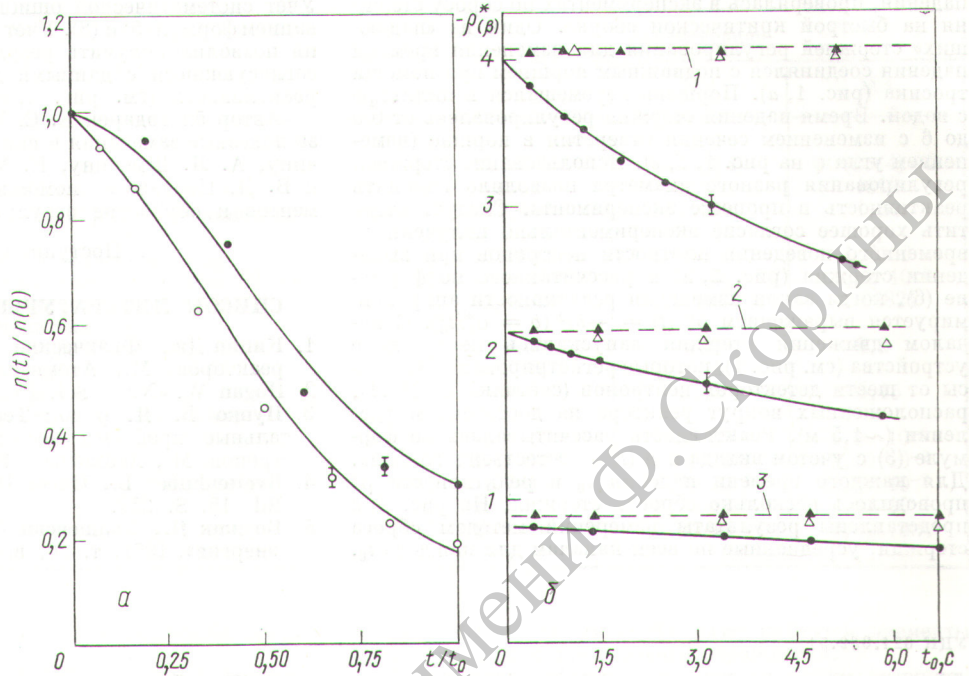


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — реактор; 2 — стержень регулирования; 3 — опора; 4 — тросик; 5 — электронная аппаратура; 6 — цилиндр с водой; 7 — поршень; φ — угол раскрытия щели в поршне, град; t_0 — время падения стержня, с



Р и с. 2. Экспериментальные данные:
 а — изменение потока нейтронов при падении стержня для $\rho_0^* = 2,15$; \circ, \bullet — $t_0 = 0,5$ и 6 с;
 б — зависимость реактивности от времени падения стержня: \bullet — без учета реального движения стержня (3); $\blacktriangle, \triangle$ — с учетом реального движения стержня, (8) и (5) соответственно; $\gamma(t_0, \rho^*)$ рассчитано по (4) на ЭВМ «Наири-1»; — — — реактивность, измеренная независимым методом ($1 - \rho_0^* = -4,05 \pm 0,002$; $2 - \rho_0^* = -2,15 \pm 0,01$; $3 - \rho_0^* = -0,81 \pm 0,005$)

целью введем коэффициент

$$\gamma(t_0, \rho^*) = \frac{\int_0^{\infty} [n(t) - n_0(t)] dt}{n(0) \left(\Lambda^* + \sum_{i=1}^6 a_i / \lambda_i \right)} \quad (4)$$

величина которого, по определению, ответственна за систематическую ошибку в реактивности при конечном времени падения стержня. Тогда из формулы (3), используя выражение для $\gamma(t_0, \rho^*)$, получаем

$$\rho_0^* = \frac{\rho_{t_0}^*}{1 - \rho_{t_0}^* \gamma(t_0, \rho^*)} \quad (5)$$

Учитывая, что $\frac{\Lambda^* dn}{n dt} \ll \rho^*(t)$, из уравнения (1) имеем

$$n(t) = \frac{\Lambda^* \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t)}{\rho^*(t) + 1} \quad (6)$$

Интегрирование (2) с учетом всех групп запаздывающих нейтронов дает

$$\Lambda^* \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) = \sum_{i=1}^6 a_i \exp(-\lambda_i t) + \sum_{i=1}^6 a_i \lambda_i \exp(-\lambda_i t) \int_0^t n(\tau) \exp(\lambda_i \tau) d\tau \quad (7)$$

Чаще всего изменение реактивности со временем при падении стержня хорошо описывается выражением вида $\rho^*(t) = -bt^2$. Используя последнюю формулу и выражения (2) и (6) при допущении одной «эффективной» группы запаздывающих нейтронов, получаем аналитическое решение для $n(t)$. Тогда формулы (4) и (5) позволяют найти решение для ρ_0^* , которое зависит только от экспериментально определяемых величин:

$$\rho_0^* = \rho_{t_0}^* \left[1 + \left(\frac{\rho_{t_0}^* + 1}{\sqrt{\rho_{t_0}^*}} \arctg \sqrt{\rho_{t_0}^* - 1} \right) \frac{t_0}{6} \frac{a_i}{\lambda_i} \right] \quad (8)$$

Следует подчеркнуть, что, хотя выражение (8) получено в предположении малости ошибки, применение его, даже когда ошибка достигает десятков процентов, дает удовлетворительные результаты. Оценки показывают, что хорошие результаты могут быть получены, если

при расчете $\gamma(t_0, \rho^*)$ допустить $\int_{t_0}^{\infty} [n(t) - n_0(t)] dt \approx 0$.

Таким образом, нахождение ρ_0^* по выражению (5) сводится к использованию таблиц для коэффициентов $\gamma(t_0, \rho^*)$, рассчитанных для закона изменения реактивности $\rho^*(t)$ при возможных значениях t_0 и $\rho_{t_0}^*$, при этом в выражении (4) для $\gamma(t_0, \rho^*)$ интегрирование проводится по конечному интервалу времени t ($0 \leq t \leq t_0$).

Применимость изложенного подхода к учету систематической ошибки, связанной с конечным временем

падения, проверялась в экспериментах по сбросу стержня на быстрой критической сборке. Один из «падающих» стержней регулирования для изменения времени падения соединялся с подвижным поршнем при помощи тросика (рис. 1, а). Поршень перемещался в цилиндре с водой. Время падения стержня регулировалось от 0,5 до 6 с изменением сечения отверстия в поршне (изменением угла φ на рис. 1, б, в). Использование стержней регулирования разного диаметра позволило изменять реактивность в процессе эксперимента. Следует отметить хорошее согласие экспериментально полученного временного поведения плотности нейтронов при выведении стержня (рис. 2, а) и рассчитанного по формуле (6), когда закон изменения реактивности аппроксимируется выражением $\rho^*(t) = -bt^2$ ($b = \sigma_0^*/t_0^2$). С началом движения стержня запускались пересчетные устройства (см. рис. 1), которые регистрировали импульсы от шести детекторов нейтронов (счетчики СНМ-11), расположенных вокруг реактора на достаточном удалении (~1,5 м). Реактивность рассчитывалась по формуле (3) с учетом вклада в $n(t)$ от естественного фона. Для каждого времени падения t_0 и реактивности ρ_0^* проводилось несколько сбросов стержня. На рис. 2, б представлены результаты измерений методом сброса стержня, усредненные по всем каналам для каждого t_0 .

Учет систематической ошибки проводился с использованием формул (5) и (8). Учет реального движения стержня позволил получить результаты, достаточно хорошо согласующиеся с данными других методов измерения реактивности (см. рис. 2, б).

Автор благодарен Е. С. Матусевичу и В. Я. Пупко за полезные замечания и внимание к работе, М. Е. Колчину, А. Л. Шмотину, К. М. Котову, Л. М. Разиной и В. Д. Цвераве за помощь при проведении экспериментов и обработке результатов.

Поступило в Редакцию 15/VII 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кишин Дж. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1967.
2. Hogan W. «Nucl. Sci. Engng», 1960, v. 8, p. 518.
3. Пупко В. Я. В сб.: Теоретические и экспериментальные проблемы нестационарного переноса нейтронов. М., Атомиздат, 1972, с. 192.
4. Vveitenhuber L., Huber H. «Atomkernenergie», 1970, Bd 15, S. 259.
5. Боужик Я., Хвашевски С., Яблонски К. «Атомная энергия», 1974, т. 30, вып. 4, с. 381.

УДК 621.039.51

Исследование параметров критической сборки

ТОМСОНС Э. Я., БУТЕ В. В., ГАВАР В. В., ДИНДУН А. С., КРУЗЕ У. А., ПЛАТАЦИС Э. Я.

Загрузка делящегося материала ядерного реактора непосредственно зависит от числа и геометрической формы твэлов и их размещения в активной зоне, а также от состава и толщины отражателя нейтронов (воды, графита). Компенсирующая способность органов регу-

лирования критической сборки зависит от состава активной зоны и отражателя нейтронов, а также от места размещения их в реакторе.

В настоящей статье сравниваются ядерно-физические параметры трех исследованных конфигураций крити-

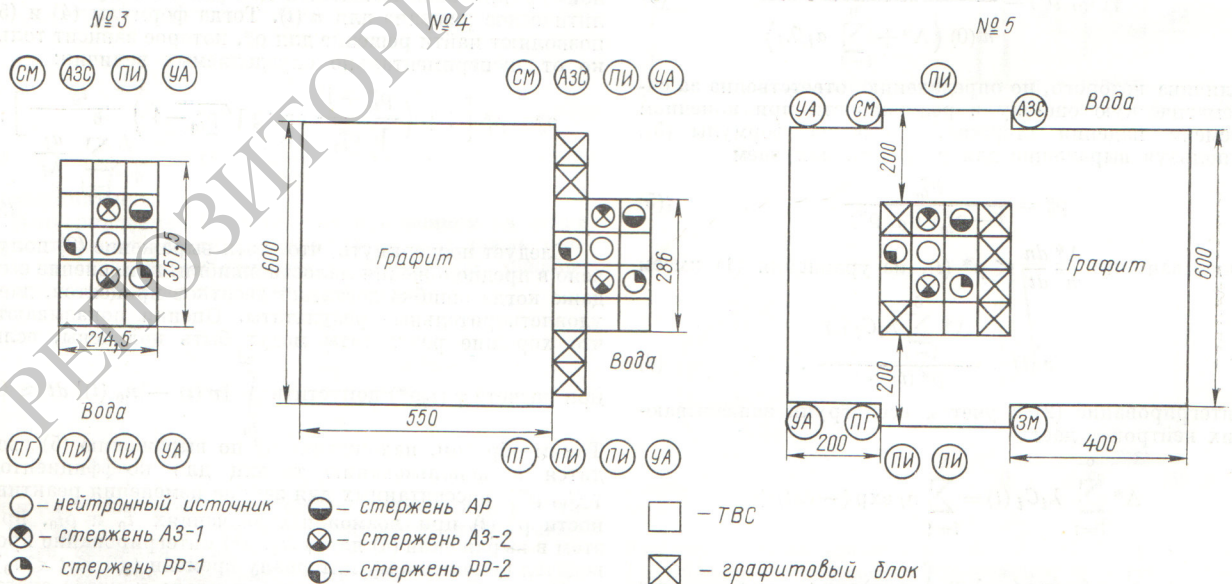


Рис. 1. Картограмма конфигураций № 3, 4 и 5 критической сборки