

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neutron Transmutation Doping in Semiconductors (Proc. Second. Intern. Conf. Missouri, 25—26 Apr. 1978). N.Y., Plenum Press, 1979.
2. Харченко В. А., Соловьев С. П. «Изв. АН СССР. Сер. неорганические материалы», 1971, т. VII, № 12, с. 2137.
3. Комаров В. Э., Кухто О. Л., Соловьев С. П. «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 4, с. 29.
4. Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В. Ядерно-физические константы, М., Госатомиздат, 1963.

5. Глестон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
6. Физика ядерных реакторов. Пер. с англ. Под ред. И. А. Стенбока. М., Атомиздат, 1964.
7. Janus H., Malmros O. «IEEE Trans. Electr. Dev.», 1976, v. ED-23, N 8, p. 797.
8. Brugger R., Yelon W. In: Proc. Conf. «Neutron Scattering.» Catlinburg, 6—10 June 1976, v. 11, p. 1117.

Поступило в Редакцию 12.11.79
В окончательной редакции 18.02.80

УДК 621.039.553:621.039.573

Взаимное влияние в водяном отражателе каналов радиационных контуров

РЫБКИН И. И., СТАРИЗНЫЙ Е. С., НОВГОРОДЦЕВ Р. Б., ТИЩЕНКО В. В.

Рабочие вещества радиационных контуров (РК) содержат, как правило, хорошие поглотители тепловых нейтронов. Так, ^{115}In , входящий в качестве основного компонента в индий-галлиевый или индий-галлиево-оловянный сплавы, имеет микроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов ~ 190 б ($1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$). Поэтому генераторы активности (ГА) таких РК сильно возмущают поле тепловых нейтронов.

Методы расчета возмущений, вносимых поглощающими телами классической геометрии (шар, цилиндр, плоскость), рассмотрены в работе [1]. Реальные конструкции ГА выполняются, как правило, в виде многоканальных сборок, расчеты которых сложны из-за учета взаимного влияния каналов, что не всегда обеспечивает в процессе разработки установки с РК требуемую точность в определении радиационных, технологических и экономических параметров.

Поэтому при создании РК проведено экспериментальное моделирование многослойных ГА [2, 3], позволившее получить при незначительных затратах рабочего вещества высокую мощность γ -излучения в облучателях. Опыт создания и длительная эксплуатация серии РК при исследовательских ядерных реакторах доказали техническую осуществимость и экономическую целесообразность мощных РК на АЭС с реакторами типа ВВЭР и РБМК [4].

Генераторы активности РК на АЭС должны располагаться в отражателе, чтобы их влияние на реактивность реактора было минимально. Проектные проработки показали, что наиболее технологичными являются трубчатые каналы, образующие пучки, либо решетки стержней, поскольку в этом случае рабочее вещество образует, по сути, поглощающий стержень (назовем такие каналы стержневыми). Поиск путей увеличения мощности γ -излучения в облучателе РК при ядерных реакторах канального типа привел к конструкции ГА в виде коаксиальных цилиндрических слоев рабочего вещества, перемежающихся со слоями воды. Реализация таких ГА не связана с принципиальными техническими трудностями (рабочее вещество перемещается в зазоре между двумя коаксиальными трубами). Поэтому большой интерес представляет информация о взаимном влиянии каналов ГА в замедлителе, особенно в воде, которая является отражателем и теплоносителем в ВВЭР и замедлителем в ГА радиационных контуров при РБМК.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования взаимного влияния каналов ГА (образующих либо решетку стержней, либо от одного до трех цилиндрических слоев рабочего вещества) в водяном замедлителе. Под коэффициентом взаимного влияния

для i -го канала ГА f_i^* — понимается отношение средней активности рабочего вещества в этом канале к активности остальных каналов \bar{A}_i^* к средней активности рабочего вещества в том же, но изолированном канале \bar{A}_i , т. е.

$$f_i^* = \bar{A}_i^* / \bar{A}_i = \bar{\varphi}_i^* / \bar{\varphi}_i,$$

где $\bar{\varphi}_i^*$, $\bar{\varphi}_i$ — средние значения плотности потоков тепловых нейтронов в рабочем веществе в i -м канале в окружении остальных каналов и в изолированном канале соответственно.

Эксперименты проводили на критическом стенде с такой же размножающей средой, как у реактора ВВР-Ц [5], и водяным отражателем. Стержневые каналы изготовляли из кварцевых трубок, заполненных индий-галлиевым сплавом (внутренний радиус $R_{\text{II}} = 1,5 \div 10$ мм, высота 600 мм), и размещали в каркасе из оргстекла с шагом $\Sigma_s d = 0 \div 1$ (Σ_s — макроскопическое сечение рассеяния замедлителя, d — расстояние между осями стерж-

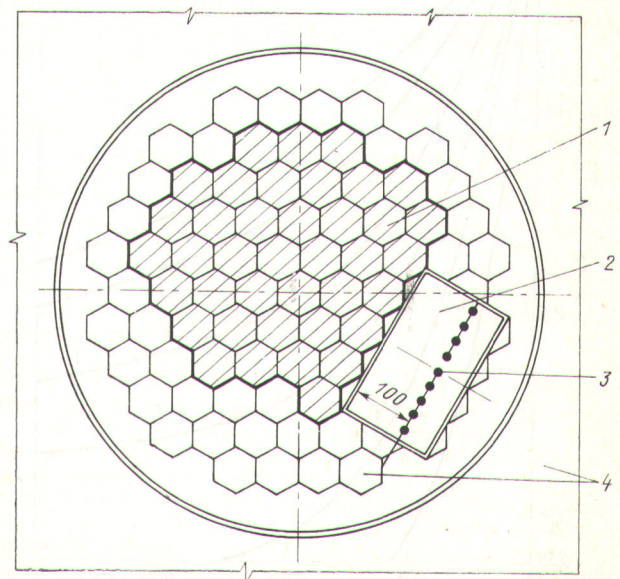
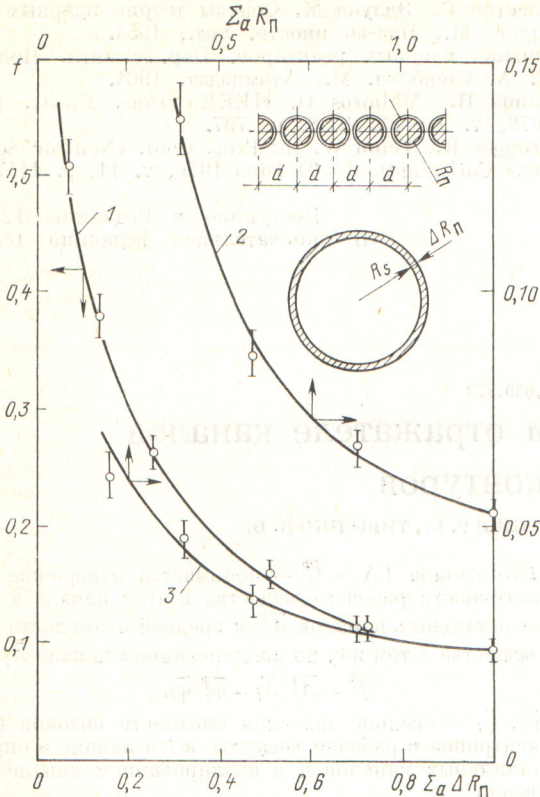
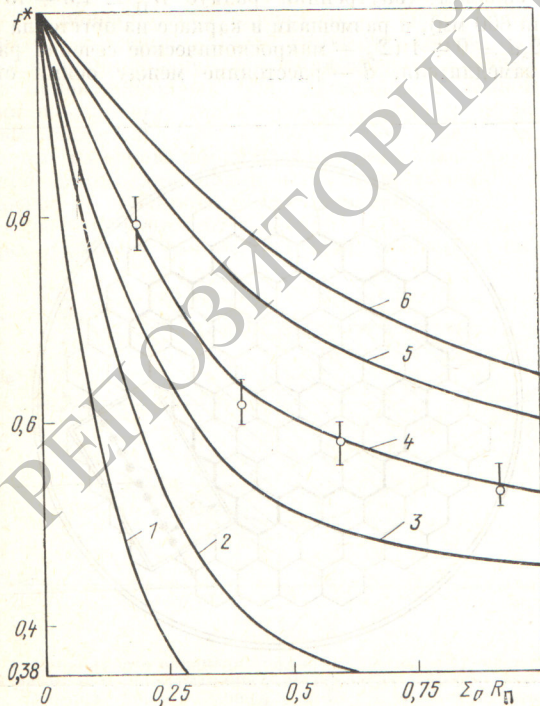


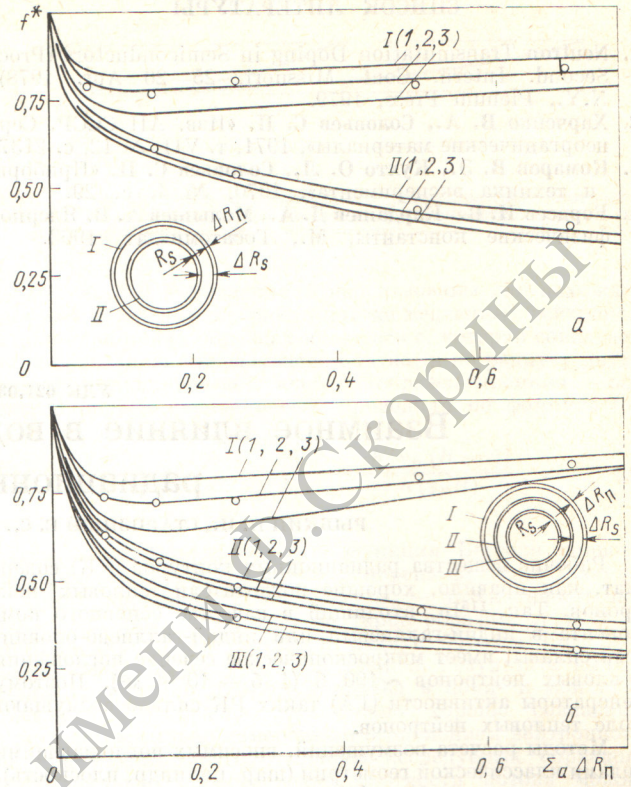
Рис. 1. Схема размещения стержневых каналов ГА в водяной полости критического стенда: 1 — активная зона; 2 — водяная полость; 3 — решетка стержневых каналов ГА; 4 — водяной отражатель



Р и с. 2. Зависимость коэффициентов $f = f(\Sigma_a \Delta R_{II}, \Sigma_a R_{II})$, учитывающих самоэкранирование плотности потока тепловых нейтронов полым цилиндром (1), стержнем каналом (2) и решеткой стержней с шагом $(2R_{II} + 0,2)$ см (3) в воде



Р и с. 3. Зависимость f^* решетки стержневых каналов ГА от $\Sigma_a R_{II}$ и $\Sigma_{sd} = 1,72$ (1); 3,45 (2); 5,17 (3); 6,90 (4); 8,62 (5); 10,35 (6)



Р и с. 4. Зависимость коэффициентов взаимного влияния двух (а) и трех (б) соосных полых цилиндрических каналов ГА от толщины прослойки поглотителя $\Sigma_a \Delta R_{II}$ и замедлителя $\Sigma_s \Delta R_s = 6,90$ (1); 3,45 (2); 1,72 (3) при $\Sigma_s R_s = 6$

ней)*. Решетка считалась бесконечной, если отсутствовало влияние периферийных стержней на рассматриваемый стержень, окруженный другими стержнями решетки.

Полые цилиндрические каналы изготовляли в виде обечаек из оргстекла (толщина стенки 1 и высота 350 мм), между которыми размещали фольги из индия толщиной $\Sigma_a \Delta R_{II} = 0,1 \div 0,75$ (Σ_a — макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов, ΔR_{II} — толщина фольги).

Облучение проводили в специальной водяной полости размером 273×165 мм, расположенной в отражателе критического стенда (рис. 1), при постоянной мощности в течение ~30 мин. Зону облучения во всех экспериментах выбирали с преимущественно тепловыми нейтронами с плотностью невозмущенного потока $\Phi_{0i} \approx 5 \cdot 10^7$ нейтр./(см²·с) (R_{Ca} по индию более 10 при толщине кадмиевого чехла 0,8 мм). Нормирование на уровень мощности критического стенда осуществляли с использованием индиевого монитора постоянной массы, загружаемого в одну и ту же точку отражателя. Среднюю плотность потока тепловых нейтронов в индий-галлиевом сплаве определяли по активности пробы, отбираемой после перемешивания сплава в объеме канала, а в индиевых фольгах — по активности индикаторов, вырезаемых из фольг на уровне полувьсоты цилиндров по их периметру. Среднюю невозмущенную плотность потока тепловых нейтронов $\bar{\Phi}_{0i}$ определяли по активности индиевых индикаторов диа-

* Здесь и в дальнейшем линейные размеры выражены через их произведения на соответствующие макроскопические сечения.

метром 10 мм с концентрацией индия ~ 3 мг/см², установленных на подложке из оргстекла, соответствующей геометрии канала как $\frac{1}{l} \int \Phi_{0i} dl$ (l — длина канала). Актив-

ность проб и индикаторов измеряли в постоянной геометрии на спектрометрической установке с датчиком из сцинтиллирующей пластмассы [6]. При этом предельная относительная погрешность измерений не превышала 10%.

Экспериментальные значения коэффициентов, учитывающих самоэкранирование и возмущение плотности потока тепловых нейтронов $f_i = \bar{\Phi}_i / \bar{\Phi}_{0i}$, для стержневого канала, одного полого цилиндра и бесконечной решетки стержней с шагом $(2R_{II} + 0,2)$ см представлены на рис. 2. При радиусе внутренней полости цилиндра $6 \leq \Sigma_s R_s \leq 10$, как показали измерения, значения $f_i = f(\Sigma_a \Delta R_{II})$ практически не зависят от $\Sigma_s R_s$ (R_s — внутренний радиус полого цилиндра).

На рис. 3 приведены значения коэффициентов взаимного влияния f_i^* для стержневых каналов в бесконечной решетке в зависимости от их шага и радиуса, на рис. 4 — значения коэффициентов f_i^* для двух или трех полых соосных цилиндров в зависимости от толщины поглощающих слоев и прослоек замедлителя между ними.

Полученные результаты полезны не только для расчета и оптимизации генераторов активности радиационных

контуров с неделяющимися рабочими веществами, а также для разработки других экспериментальных устройств указанной геометрии.

Авторы выражают благодарность И. Т. Гавриленко, В. П. Савиной, Н. И. Гончарову за помощь в подготовке и проведении экспериментов на критическом стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарков В. А., Зорина Т. П., Фрадкин Г. М. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 4, с. 369.
2. Сахаров Е. С., Чучалин И. П. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 6, с. 432.
3. Кикнадзе Г. И. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 31, вып. 2, с. 113.
4. Брегер А. Х. Радиационно-химическая технология. Ее задачи и методы. М., Атомиздат, 1979.
5. Моисеенко П. П., Карпов В. Л. В кн.: Труды II Женевск. конф. Докл. сов. ученых. Т. 6. М., Госатомиздат, 1959.
6. Маркина М. А., Старизный Е. С., Брегер А. Х. «Атомная энергия», 1978, т. 44, вып. 6, с. 525.

Поступило в Редакцию 27.11.79
В окончательной редакции 29.02.80

УДК 621.039.514

Динамика реакторов с положительной обратной связью по реактивности

САБАЕВ Е. Ф.

Как известно, решения, уходящие в бесконечность за конечное время, называются решениями взрывного типа. Если такие решения имеются в любой сколь угодно малой окрестности состояния равновесия, то неустойчивость называется взрывной неустойчивостью. В настоящей работе рассматривается вопрос о существовании и оценках решений взрывного типа для довольно общей модели динамики реактора, включающей описание его кинетики, обратных связей по реактивности и системы регулирования или защиты реактора. Получено уравнение сравнения невысокого порядка (дифференциальное неравенство), дающее оценки решений исходной системы.

Динамику реактора в одноточечной модели кинетики опишем следующей системой довольно общего вида:

$$\begin{aligned}
 l \frac{dn}{dt} &= n [\delta k_0(\sigma) + \mathbf{b}^T \mathbf{x}] + \sum_{i=1}^6 \beta_i (n_i - n); \\
 dn_i/dt &= \lambda_i (n - n_i), \quad i = 1, 2, \dots, 6; \\
 dx/dt &= A\mathbf{x} + \mathbf{a}n; \\
 d\sigma/dt &= -V \operatorname{sign}(n - 1).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь n, n_i — относительные плотность потока нейтронов и концентрация источников запаздывающих нейтронов; \mathbf{x} — вектор из R^N , описывающий состояние обратной связи по реактивности; $\delta k_0(\sigma)$ — реактивность, вносимая стержнями регулирования; σ — положение поглощающих стержней; V — скорость перемещения стержней; A — постоянная $N \times N$ -матрица; \mathbf{a}, \mathbf{b} — постоянные векторы из R^N ; $\delta k_0(\sigma)$ — неубывающая ограниченная функция.

Для удобства дальнейшего исследования введем уравнение

$$d\tau/dt = -r\tau + n,$$

где r — некоторая постоянная. Решение при $r \neq 0$ сводится к случаю $r = 0$ с помощью соответствующей замены переменных. Поэтому далее исследование проводится при $r = 0$. В этом случае τ пропорционально количеству тепла, выделившемуся за время t .

В пространстве R^N введем конус K , т. е. будем писать $\mathbf{x} \in K$ (или $\mathbf{x} \geq 0$), если для всех $t \geq 0$ выполнено неравенство

$$\mathbf{b}^T \exp(At) \mathbf{x} \geq 0. \tag{2}$$

Предположим, что K — нормальный телесный конус (определение нормального телесного конуса см. в работах [1, 2]). Из этого предположения следуют некоторые ограничения на матрицу A . Например, если \mathbf{b} — вектор с неотрицательными компонентами и A — матрица с отрицательными внедиагональными элементами, то неравенство (2) определяет нормальный телесный конус. Если $\mathbf{a} \in K$, то неравенство (2) означает, что отклик реактивности на δ -образное возмущение нейтронного потока является положительной функцией; такую обратную связь естественно называть положительной. Предположим, что

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}^+ - \mathbf{a}^-,$$

где $-\mathbf{A}\mathbf{a}^+ \in K$ и $-\mathbf{A}\mathbf{a}^- \in K$. Если $\det A \neq 0$, то такое представление возможно для любого $\mathbf{a} \in R^N$, поскольку AK также является нормальным телесным конусом. Если матрица A — гурвицева (спектр A принадлежит левой полуплоскости), то $-A^{-1}$ является положительным по конусу K оператором, т. е. ставит в соответствие элементу из K элемент из K . В этом случае из условия $-\mathbf{A}\mathbf{a}^+ \in K$ следует $\mathbf{a}^+ \in K$.

Далее полагаем $\mathbf{x} = \mathbf{x}^+ + \mathbf{x}^-$ и исследуем решения уравнений

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{x}^+/d\tau &= A\mathbf{x}^+/n + \mathbf{a}^+; \\
 d\mathbf{x}^-/d\tau &= A\mathbf{x}^-/n - \mathbf{a}^-
 \end{aligned}
 \tag{3}$$