

органа управления — борные (поглотители) и урановые (компенсаторы) стержни, погруженные в зону малого обогащения (ЗМО). Органы СУЗ в виде цилиндрических зон были расположены симметрично по азимутальному углу  $\theta$  на равном расстоянии от центра ЗМО. Результаты расчета  $k_{эф}$  быстрого реактора, описываемого перечисленными моделями, вместе с погрешностями моделей, представлены в табл. 2. Как и следовало ожидать, наибольшее расхождение результатов наблюдается для модели с борными стержнями, значительно деформируемыми нейтронное поле в реакторе. При переходе от базовых моделей к двумерным круговым изменение расчетной величины  $k_{эф}$  вызывается приближенным моделированием не только СУЗ, но и реактора в целом, что и объясняет большое значение эффекта. Уменьшение блокировки поглощения борных стержней при переходе к более упрощенным моделям вызывает кажущееся повышение их эффективности. Погрешности моделей влияют на распределение плотности потока нейтронов  $\phi$  (см. рис. 2, где показано распределение  $\phi$  в плоскости  $z = 0$ , соответствующей уровню погружения стержней, по прямой, проходящей через центр зоны ЗМО и СУЗ). Интересно отметить заметную чувствительность  $\phi$  к расположению центра тяжести стержня: смещение центра тяжести секторного

органа управления по сравнению с круговым вызывает соответствующее смещение минимума  $\phi$ .

Наличие разноточающих свойств у системы урановых стержней (компенсаторов) усложняет природу деформации поля нейтронов, изменения  $k_{эф}$  и затрудняет предсказание такого измерения.

Результаты исследований показывают, что необходимо учитывать погрешности, связанные с использованием расчетных моделей, а также их оценки для других стандартных ситуаций, возникающих при проектировании быстрых реакторов различных типов.

Поступило в Редакцию 25.XI.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слесарев И. С., Сироткин А. М. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 6, с. 419.
2. Слесарев И. С., Сироткин А. М. «Журн. вычисл. мат. и мат. физ.», 1976, т. 16, № 2, с. 399.
3. Слесарев И. С., Сироткин А. М. Вариационно-разностные схемы в теории переноса нейтронов. М., Атомиздат, 1978.

удк 621.039.58:621.311.2

Оценка накопления трития в ВВЭР с учетом вклада  ${}^6\text{Li}$

ГОЛУБЕВ Л. И., ИЛЯСОВ В. М., НОВИКОВ Ю. Б., БЕЛЫШЕВА Л. Ю., СУПРУН Н. Н.

Образование трития в первом контуре ядерных энергетических реакторов приводит к увеличению дозовой нагрузки для обслуживающего персонала и дополнительному загрязнению окружающей среды.

В работе [1] рассматривались ядерные реакции образования трития в ВВЭР в основном на протонах бора, но не оценивалась роль  ${}^6\text{Li}$ . Этот изотоп имеет большое сечение реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  на тепловых нейтронах, равное  $936 \pm 6$  б [2], и незначительные примеси его в теплоносителе могут вызывать существенное накопление трития. По данным химического анализа [1, 3], в первом контуре второго, третьего и четвертого блоков Нововоронежской АЭС (НВАЭС) содержится литий, образование которого обычно связывают с ядерной реакцией  ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ . В накопление трития вклад  ${}^7\text{Li}$  незначителен (сечение 0—400 мб в интервале энергии 3—6 МэВ). Однако в теплоносителе может попасть природный литий как примесь химических реактивов, например, гидроокиси калия, добавляемой в первый контур для поддержания водно-химического режима, или какими-либо другими путями. В этом случае в литии будет содержаться  ${}^6\text{Li}$ .

Изотопный состав лития в теплоносителе ВВЭР, ат. %

№ пробы	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$
1	$3,60 \pm 0,20$	$96,40 \pm 0,20$
2	$6,05 \pm 0,15$	$93,95 \pm 0,15$
3	$6,82 \pm 0,12$	$93,18 \pm 0,12$
4	$1,4 \pm 0,4$	$98,6 \pm 0,4$

Для количественной оценки концентрации  ${}^6\text{Li}$  в теплоносителе ВВЭР НВАЭС применен масс-спектрометрический метод. С этой целью отбирались пробы 1—3 (см. таблицу) из непрерывной продуквки первого контура четвертого блока [4] через несколько суток работы реактора до и после ввода гидроокиси калия. Проба 4 отобразила из непрерывной продуквки первого контура второго блока при работе реактора более 30 сут. Литий осаждался в виде фосфата [5] и переводился в азотнокислую форму. Масс-спектрометрические измерения проводились на приборе МИ-1201, оборудованном трехэлектронным источником ионов с поверхностной ионизацией молекул [6]. При выбранных условиях анализа и значении приборной погрешности измерений фракционирование изотопов лития не обнаружено и поправок на этот эффект в результат анализа не вводилось.

Исследованиями установлено, что в воде первого контура реакторов второго и четвертого блоков содержится  ${}^6\text{Li}$ . Сравнение результатов измерения состава лития до (проба 2) и после (проба 3) ввода гидроокиси калия показывает увеличение процентного содержания  ${}^6\text{Li}$ . При длительной работе реактора отношение  ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$  уменьшается (проба 4). Наличие  ${}^6\text{Li}$  в воде первого контура приводит к повышенному накоплению трития. Оценка накопления трития при активации  ${}^6\text{Li}$  проведена в предположении, что содержание  ${}^6\text{Li}$  постоянно и составляет 1% общего количества лития в теплоносителе, а концентрация последнего равна  $0,4$  мг/л.

Расчетная равновесная активность трития в теплоносителе первого контура оказалась равной  $7 \cdot 10^{-5}$  Ки/л. Это значение практически совпадает с активностью трития, экспериментально измеряемой в теплоносителе ВВЭР-440. Результаты исследований подтверждают

необходимость строгого контроля за содержанием лития в химических реактивах, вводимых в первый контур реактора.

Поступило в Редакцию 8.XII.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аболмасов Ю. П. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 1, с. 52.  
 2. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. М., Атомиздат, 1968.

3. Плотников И. М., Голубчикова И. Г. В кн.: Десятилетний опыт эксплуатации Нововоронежской АЭС. Нововоронеж, 1974, с. 126.  
 4. Овчинников Ф. Я. и др. Опыт эксплуатации Нововоронежской АЭС. М., Атомиздат, 1972.  
 5. Полуэктов Н. С. и др. Аналитическая химия лития. М., «Наука», 1975.  
 6. Палмер Г. В кн.: Успехи масс-спектрометрии. М., Изд-во иностр. лит., 1963, с. 95.

УДК 539.12.172

К вопросу о пространственно-угловых распределениях быстрых нейтронов в железе

БАРКОВСКИЙ А. Н., ПОПКОВ К. К.

Возможности метода сведения уравнения Больцмана к системе интегральных уравнений при решении задач физики защиты от излучений изучены недостаточно. Попытки применения этого метода для подобных целей ограничивались транспортным приближением в представлении индикатрисы рассеяния [1, 2], хотя система интегральных уравнений для произвольной индикатрисы получена давно [2]. Есть основания предполагать, что метод интегральных уравнений может быть использован для изучения детальных характеристик полей нейтронного и  $\gamma$ -излучений, что, в частности, дает возможность получить тонкую структуру угловых распределений, поскольку позволяет найти точное решение уравнения переноса для данного представления индикатрисы рассеяния.

Используя многогрупповое приближение кинетического уравнения в плоской геометрии, путем преобразований, описанных в работе [2], и введения оптической координаты  $x$  можно получить систему интегральных уравнений для угловых моментов плотности потока излучений  $\Phi_{kl}(x)$ . После тождественных преобразований эта система принимает следующий вид:

$$\Phi_{kl}(x) = F_{kl}(x) - \sum_{i=0}^{E/2-1} \beta_{\{12-i\}\{6-i\}} \times \\ \times [\Phi_{k, l-2i-2}(x) - F_{k, l-2i-2}(x)] + \\ + \beta_{l0} \sum_{i=0}^L \int_0^{x_0} S_{ki}(t) E_i^l(|x-t|) [\text{sign}(x-t)]^{i+l} dt, \quad (1)$$

где

$$\Phi_{kl}(x) = \int_{-1}^1 \Phi_k(x, \omega) P_l(\omega) d\omega; \\ F_{kl}(x) = \int_0^1 P_l(\omega) [e^{-x/\omega} \Psi_{1k}(\omega) + \\ + (-1)^l e^{-(x_0-x)/\omega} \Psi_{2k}(-\omega)] d\omega;$$

$$S_{ki}(x) = \sum_{n=0}^k \Psi_{ni}(x) \alpha_i^{n-k}(x) + Q_{ki}(x);$$

$$\alpha_i^{n-k}(x) = (2i+1) \pi \int_{-1}^{+1} \alpha_s^{n-k}(x, \mu) P_i(\mu) d\mu;$$

$$Q_{ki}(x) = \frac{2i+1}{2\Sigma_{tk}(x)} \int_{-1}^{+1} q_k(x, \omega) P_i(\omega) d\omega;$$

$$\alpha_s^{n-k}(x, \mu) = \frac{\Sigma_s^{n-k}(x, \mu)}{\Sigma_{tk}(x)};$$

$$E_i^l(x) = \sum_{k=0}^{E(i/2)} \beta_{ik} E_{l+i+1-2k}(x);$$

$$E_n(x) = x^{n-1} \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t^n} dt,$$

$k$  — номер энергетической группы;  $q_k(x, \omega)$  — плотность независимых источников  $k$ -й энергетической группы;  $\Phi_k(x, \omega)$  — угловой поток в направлении  $\arccos \omega$ ;  $\mu$  — косинус угла рассеяния;  $\Sigma_{tk}(x)$ ,  $\Sigma_s^{n-k}(x)$  — полное сечение и сечение перехода из  $n$ -й в  $k$ -ю группу;  $x_0$  — оптическая толщина пластины;  $E(\epsilon)$  — целая часть  $\epsilon$ ;  $\beta_{ik}$  — двумерная матрица, состоящая из постоянных коэффициентов;  $L$  — число членов ряда, оставленных в разложении;  $\Psi_{1k}(\omega) = \Phi_k(0, \omega) |_{\omega > 0}$ ,  $\Psi_{2k}(\omega) = \Phi_k(x_0, \omega) |_{\omega < 0}$ .

Система уравнений (1) положена в основу алгоритма программы ОПУС-п. Эта программа написана на языке АЛГОЛ и позволяет получить пространственно-энергетические и угловые распределения плотности потоков излучений (нейтронов и  $\gamma$ -квантов) в плоской одномерной геометрии. При этом погрешность результатов определяется точностью задания индикатрисы рассеяния, т. е. числом членов разложения ее в ряд по полиномам Лежандра, а также точностью использованных квадратурных формул. Программа ОПУС-п обеспечивает возможность использования до 13 членов этого