

или тяжелым осколком. При этом полученные результаты находятся в соответствии с существующими представлениями о физике процесса деления, согласно которым легкий осколок возбужден сильнее тяжелого. Избыток энергии возбуждения, по-видимому, несколько «смазывает» парные эффекты.

Вторая гипотеза, учитывающая эффекты четности в изобарном зарядовом распределении, обеспечивает по сравнению с первой гипотезой более высокую достоверность оценки относительных независимых выходов ПД (см. таблицу). Однако значения χ^2 в рассмотренных случаях весьма высоки. Причины этого могут быть следующие: представление изобарного зарядового распределения ПД функцией Гаусса некорректно; опубликованные значения экспериментальных погрешностей выходов занижены; усреднение экспериментальных значений выходов и их погрешностей не может быть проведено по формулам (1) и (2).

Последние две причины, по-видимому, наиболее вероятны. На заниженность приводимых в оригинальных экспериментальных работах значений погрешностей выходов указывается в [8]; об этом свидетельствует и частое несопадение значений выходов одних и тех же ПД [5, 8] в пределах погрешностей, полученных в различных работах. Предположение о независимости усредняемых величин как необходимое условие применимости метода накладывает запрет на использование в различных экспериментальных работах каких-либо идентичных промежуточных данных. Такой запрет во многих случаях не соблюдается. Тем не менее другие альтернативных способов усреднения значений выходов ПД в настоящее время не существует. Такие способы должны, по-видимому, включать в качестве

составной части методiku оценки выходов и опираться на значительно более подробное описание оригинальных экспериментов.

Так как объем информации недостаточен для получения достоверных количественных выводов и их практического использования, необходимо дальнейшее накопление экспериментальных данных о независимых выходах ПД для исследований эффектов четности в их зарядовом распределении.

Поступило в Редакцию 28/X 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колдобский А. Б., Колобашкин В. М., Гусев А. А. «Известия вузов. Физика», 1974, № 7, с. 7.
2. Amiel S., Feldstein H. In: Proc. III IAEA Symp. «Physics and Chemistry of Fission». Rochester, 13—17 Aug., 1973, v. 2, p. 65.
3. Amiel S., Feldstein H. «Phys. Rev. Ser. C», 1975, v. 11, p. 845.
4. Musgrove A., Cook J., Trimble G. In: Proc. IAEA Panel on Fission Product Nuclear Data, Bologna, 1973, Paper. 16.
5. Crouch E. AERE-R 7680, 1974.
6. Norris A., Wahl A. «Phys. Rev.», 1966, v. 146, p. 926.
7. Parsons R., Sharma H. «J. Inorg. Nucl. Chem.», 1974, v. 36, p. 2392.
8. Walker W. AECL-4704, 1973.
9. Худсон Д. Статистика для физиков. М., «Мир», 1970.
10. Хвиммельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. М., «Мир», 1975.

УДК 628.511:621.039

О роли ядерных реакций в образовании трития на реакторах ВВЭР

АБОЛМАСОВ Ю. П., ГОЛУБЧИКОВА И. Г., САМОЙЛОВА Т. А.

При работе ядерных энергетических установок наряду с другими радиоизотопами большое внимание уделяется опасности от трития, который, являясь изотопом водорода, не задерживается в системах специальной водоочистки атомных электростанций.

На реакторах ВВЭР образование трития в активной зоне реактора происходит при облучении нейтронами примесей, содержащихся в теплоносителе, конструкционных материалах активной зоны, а также при тройном делении ядерного топлива.

Для грубой регулировки реактивности и для обеспечения ядерной безопасности в период остановок реактора в теплоноситель первого контура реакторов ВВЭР добавляют борную кислоту. Известно несколько реакций на боре, приводящих к образованию трития [1]:

- 1а — $^{10}\text{B} (n, \alpha)^7\text{Li}$; 1б — $^7\text{Li} (n, n'\alpha)^3\text{H}$
- 2 — $^{10}\text{B} (n, 2\alpha)^3\text{H}$;
- 3 — $^{10}\text{B} (n, d)^9\text{Be} (n, \alpha)^6\text{Li} (n, \alpha)^3\text{H}$;
- 4 — $^{10}\text{B} (n, d)^9\text{Be} (n, \alpha)^6\text{Li} (n, \alpha)^3\text{H}$;
- 5 — $^{11}\text{B} (n, ^3\text{H})^9\text{Be}$.

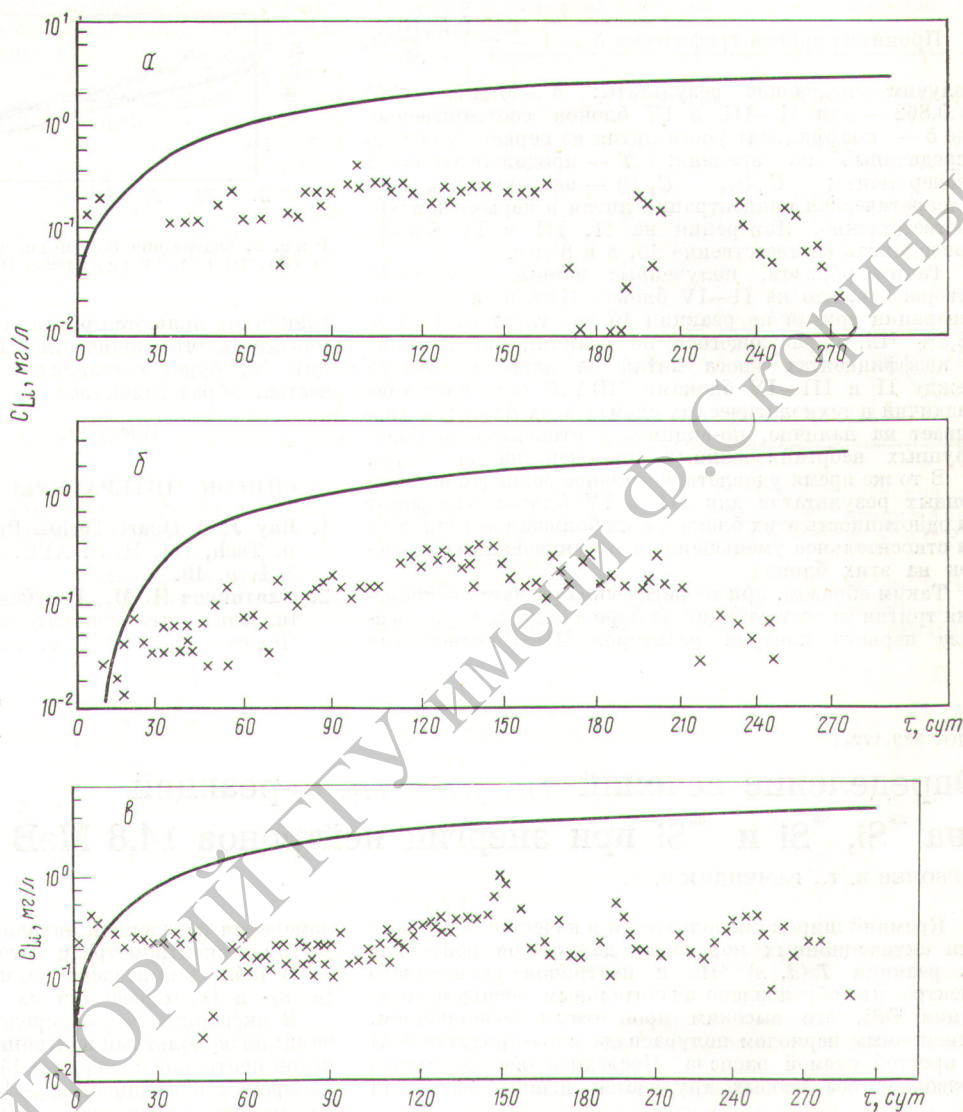
Реакция 1а используется для регулирования реактивности реактора, она проходит на тепловых нейтронах с сечением, усредненным по спектру нейтронов

реакторов ВВЭР и равным 2500 б. Реакция 1б с образованием трития идет на быстрых нейтронах с порогом ~ 3 МэВ, эффективное сечение ее растет линейно от 0 при 3 МэВ до 400 мб при 6 МэВ, оставаясь постоянным в диапазоне от 6 до 10 МэВ. Реакция 2 идет на быстрых нейтронах и имеет энергетический порог ~ 1 МэВ. Сечение этой реакции (мб) имеет следующую зависимость от энергии: $\sigma(E) = 15 \div 75$ при $E = 1 \div 5$; $5 \div 10$ МэВ. Образование трития по реакции 3 маловероятно вследствие практически моментального распада ^9Be . Реакция 4 тоже маловероятна, так как требует трех последовательных захватов и ^9Be образуется только при облучении быстрыми нейтронами порогом энергии 4,35 МэВ. Реакция 5 возможна при облучении ^{11}B быстрыми нейтронами с порогом энергии 10 МэВ, количество которых выше энергии для спектра реакторов ВВЭР, составляет только $\sim 0,4\%$.

Таким образом, определяющую роль в образовании трития при реакциях на боре могут иметь только реакции 1 и 2.

Прямой расчет количества трития в теплоносителе первого контура реакторов ВВЭР не может быть точным ввиду отсутствия данных по уносу лития из первого контура с протечками и улавливания его на установках специальной водоочистки, хотя степень уноса лития из контура может быть значительной [2].

Р и с. 1. Экспериментальные точки и расчетные кривые лития II (а), III (б), IV (в) блоков НВАЭС



Для выяснения этого вопроса на II—IV блоках Нововоронежской АЭС (НВАЭС) проводились измерения количества лития, образующегося по реакции 1а. На рис. 1 представлены эти результаты и теоретическая расчетная кривая концентрации лития, образующегося по реакции 1а, которая не учитывает унос лития из воды первого контура с протечками и улавливание его на фильтрах системы специальной водоочистки. Расчет проводился на основании данных по концентрации борной кислоты в первом контуре II—IV блоков НВАЭС и тепловой мощности реакторов, усредненным за сутки. Концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура II—IV блоков НВАЭС представлена на рис. 2. Резкие скачки концентрации борной кислоты в теплоносителе свидетельствуют об остановке реакторов на перегрузке и ППР, и при расчетах, естественно, не учитывались.

Из рис. 1 видно, что концентрация лития в первом контуре хотя и увеличивается, но не с такой скоростью, как расчетная, и подвержена сильным флуктуациям во времени, которые объясняются изменением концентрации аммиака в теплоносителе первого контура, добавляемого туда для поддержания его химических параметров и вымывающего литий, сорбированный на ионообменных смолах. В то же самое время максимальная концентрация лития, измеренная при добавлении значительных количеств аммиака в воду первого контура, не достигает расчетных величин, что указывает на наличие неорганизованных протечек.

В этом случае литий, образующийся по реакции 1а, задерживается, по-видимому, на ионообменных смолах (СВО-3) и поступает в кубовый остаток, не участвуя в преобразовании трития в активной зоне реактора.

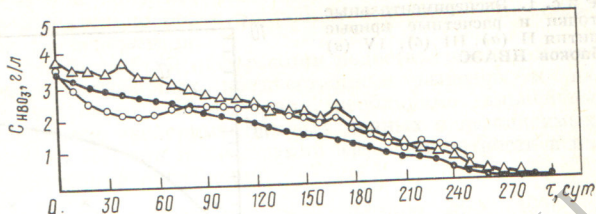
Проинтегрировав графически $\delta = 1 - \frac{1}{T} \int_0^T \frac{C_a(t)}{C_T(t)} dt$,

получим следующие результаты: $\delta = 0,897$; $0,863$ и $0,862$ — для II—III и IV блоков соответственно, где δ — коэффициент уноса лития из первого контура, усредненный по времени; T — продолжительность эксперимента; $C_a(t)$, $C_T(t)$ — экспериментальная и теоретическая концентрации лития в первом контуре соответственно. Измерения на II, III и IV блоках проводились соответственно 10, 8 и 8 мес.

Таким образом, полученные данные позволяют утверждать, что на II—IV блоках НВАЭС в процессе генерации трития по реакции 1б участвует от 10,3 до 13,8% ${}^7\text{Li}$, образующегося по реакции 1а. Разница в коэффициентах уноса лития из первого контура между II и III—IV блоками НВАЭС есть следствие различий в технологических схемах этих блоков и указывает на наличие, по-видимому, относительно более крупных неорганизованных протечек на II блоке.

В то же время удовлетворительное совпадение полученных результатов для III и IV блоков указывает на однородность этих блоков, а их большая величина — на относительно уменьшение неорганизованных протечек на этих блоках.

Таким образом, при теоретических расчетах накопления трития за счет реакций на боре в водном теплоносителе первого контура реакторов ВВЭР основными



Р и с. 2. Содержание борной кислоты в теплоносителе I контура II (●), III (○), IV (△) блоков НВАЭС (по анализу)

реакциями являются реакции 1 и 2, причем необходимо учитывать, что количество ${}^7\text{Li}$, участвующего в реакции 1б, будет составлять ~10—14% общего количества, образовавшегося по реакции 1а.

Поступило в Редакцию 15/IX 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ray J. A Quart Techn. Progr. Rev. prep. for Divis of Tech, Inf, H. S. AEC. Winter 1968—1969, v. 12, N 1, p. 19.
2. Плотников И. М., Голубчикова И. Г. В кн.: Десятилетний опыт эксплуатации Нововоронежской АЭС. Нововоронеж, 1974, с. 126.

УДК 539.172.4

Определение сечений (n, p) - и (n, α) -реакций на ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{29}\text{Si}$ и ${}^{30}\text{Si}$ при энергии нейтронов 14,8 МэВ

ЩЕБОЛЕВ В. Т., РАМЕНДИК З. А.

Кремний широко используется в качестве материала для активационных пороговых детекторов нейтронов из реакции $T(d, n) {}^4\text{He}$ и нейтронов реакторного спектра, что обусловлено значительным сечением активации ${}^{28}\text{Si}$, его высоким процентным содержанием, приемлемым периодом полураспада ядра-продукта ${}^{25}\text{Al}$ и простой схемой распада. Последнее обстоятельство позволяет без особых трудностей использовать для

измерения наведенной активности метод калиброванного гамма-спектрометра и метод β — γ -совпадений.

В табл. 1 приведены данные [1], характеризующие (n, p) - и (n, α) -реакции на изотопах кремния.

В эксперименте по определению сечений использовали: низковольтный нейтронный генератор, создающий поток нейтронов с энергией 14,8 МэВ (плотность потока измерена с погрешностью ~1% [2]); дисковые образцы из кремния диаметром ~30 мм и толщиной от 0,5 до 1 мм; мишенный узел, позволяющий располагать образцы на точно ($\pm 0,02$ мм) фиксируемых расстояниях от поверхности мишени генератора [3]; установку β — γ -совпадений с низким фоном [4]; стандартный гамма-спектрометр типа БДБС-3-1еМ; электронно-вычислительную машину М-222.

Масс-спектрометрический анализ показал, что относительное содержание изотопов кремния в образце согласуется с приведенным в табл. 1 в пределах 0,05%. При этом содержание примесей меньше 0,01%. Масса, плотность, геометрические размеры образцов и временные интервалы были измерены с погрешностью, не превышающей 0,01%.

Активность образца измерялась двумя способами. Первым был метод анализа амплитудного распределения импульсов, полученного на гамма-спектрометре с использованием амплитудного анализатора АИ-256. Оценивалась площадь фотопика, пропорциональная активности, путем аппроксимации [5] эксперименталь-

Реакции на изотопах кремния

Таблица 1

Изотоп, %	Реакция	Период полураспада, мин	Тип и энергия излучения, МэВ	Порог реакции, МэВ
${}^{28}\text{Si}$, 92,21	${}^{28}\text{Si}(n, p){}^{28}\text{Al}$	2,31	β^- , 2,870	—3,86
			γ^- , 1,780	
${}^{29}\text{Si}$, 4,70	${}^{29}\text{Si}(n, p){}^{29}\text{Al}$	6,56	β^- , 2,500	—2,98
			γ^- , 1,280	
			γ^- , 2,030	
${}^{30}\text{Si}$, 3,09	${}^{30}\text{Si}(n, \alpha){}^{27}\text{Mg}$	10,0	β^- , 2,430	—4,21
			β^- , 1,750	
			γ , 1,590	
			γ , 1,01	
			γ , 0,84	