

Выходы вторичных нейтронов из мишеней при облучении протонами с энергией 100 МэВ

Г.И. Крупный, В.Н. Пелешко, Я.Н. Расцветалов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Для решения многих прикладных радиационных задач необходима экспериментальная информация по спектрально-угловым распределениям и интегральным выходам вторичного нейтронного излучения от мишеней, бомбардируемых пучками протонов средних энергий (100-1000 МэВ). В ряде задач требуется знание соотношения вторичных нейтронов и фотонов по флюенсу или поглощенной дозе. В последнее время такая информация становится все более актуальной в связи с проектами электроядерных атомных реакторов и с решениями проблем трансмутации [1,2].

В настоящей работе, выполненной по тематике безопасности космических полетов, приводятся экспериментальные данные по выходам вторичных нейтронов в переднюю полусферу от различных мишеней, бомбардируемых пучком 100 МэВ протонов. Измерения выполнены в зале линейного ускорителя протонов ИФВЭ.

Детекторы располагались на расстоянии 1 м от мишени под углами 0; 30; 60; 90 и 120° по отношению к оси протонного пучка (геометрия опыта выбрана после измерения фоновых условий). В измерениях использовались мишени из алюминия (ПП — толщиной $t=40$ мм, плотностью $\rho=2.70$ г/см³), графита (С — $t=29.0$ мм, $\rho=1.78$ г/см³), циркония (Zr — $t=15.0$ мм, $\rho=6.44$ г/см³), сплава алюминия (АМГ — $t=13.3$ мм, $\rho=2.7$ г/см³, состав: Al=97%, Mn=1.6%, Ti=1.4%) и композитных материалов (K_1 — $t=17$ мм, $\rho=1,41$ г/см³, состав по объему: 50%-е графитовые волокна и 50%-й бакелитовый лак на основе формальдегидной смолы, состоящая на 90% из углерода, 3% водорода, 7% кислорода; и K_2 — $t=20$ мм, $\rho=2,84$ г/см³, состав по объему: 25% токсикаучуковое связующее, 75% наполнитель, содержащий оксид церия, гадолиний и диспрозий).

Для регистрации вторичного нейтронного излучения из мишеней применялись пороговые активационные детекторы из фосфора (с $E_n > 2$ МэВ), алюминия ($E_n > 6$ МэВ) и углерода (пластический сцинтиллятор, $E_n > 20$ МэВ). Характеристики детекторов приведены в [3]. Для измерения энергетических распределений нейтронов использовался спектрометр Боннера с детектором тепловых нейтронов (ДТН) на основе индия [4].

Спектры нейтронов определялись с помощью модифицированной программы восстановления PENS [5] по откликам ДТН спектрометра Боннера с подключением откликов пороговых детекторов. Флюенсы нейтронов получены интегрированием энергетических распределений. Так как используемые мишени (кроме мишени ПП) не являлись мишенями полного поглощения первичных 100 МэВ протонов, вклад в активацию детекторов, обусловленный рассеянными высокоэнергетическими протонами, учитывался дублированием каждой экспозиции, в одной из которых детектор заключался в дополнительный защитный экран [6]. Соотношение между вторичными нейтронами и гамма-излучением по поглощенной дозе для ПП-мишени изменяется от 0,98 до 1,62 в зависимости от угла [6].

Мониторирование пучка протонов осуществлялось интегрально за экспозицию по активации алюминиевой фольги и дифференциально в каждом цикле ускорителя изме-

рением заряда фольги за счет выбивания δ -электронов [6]. Мониторирование воспроизводимости и стабильности поля вторичного излучения при повторных экспозициях осуществлялось по отношению показаний мониторинговой фольги и углеродсодержащего детектора, устанавливаемого под углом 90° к оси пучка на расстоянии 1 м от мишени.

Интегральные характеристики спектров вторичных нейтронов под различными углами от мишени полного поглощения (ПП) приведены в табл. 1.

Таблица 1: Интегральные характеристики спектров нейтронов от мишени ПП.

Угол	Средняя энергия, МэВ	Компонентный состав флюенса, %		
		0,5 эВ-200 кэВ	0,2-20 МэВ	>20 МэВ
0°	$23 \pm 11\%$	7	60	33
30°	$16 \pm 8\%$	12	63	25
120°	$4,6 \pm 15\%$	19	78	3

Скорости реакций $^{31}P(n, p)^{31}Si$, $^{27}Al(n, \alpha)^{24}Na$ и $^{12}C(n, 2n)^{11}C$ для пороговых детекторов в экспозициях под разными углами приведены в табл. 2.

Угловые распределения флюенса вторичных нейтронов с энергией $> 0,5$ эВ от мишеней представлены в табл. 3. Скорости реакции и флюенсы вторичных нейтронов под 0° от тонких мишеней не измерялись из-за преобладания протонного компонента первичного пучка и оценивались на основе экстраполяции с использованием углового распределения нейтронов от мишени полного поглощения (ПП).

Выходы нейтронов из мишеней в переднюю полусферу определялись интегрированием угловых распределений флюенса и приведены в табл. 4.

При определении суммарной погрешности данных по выходу нейтронов учитывались погрешности экспериментальных данных (статистика, анизотропия, фоновые условия), мониторингования, определения флюенса, экстраполяции данных, интегрирования.

Таблица 2: Скорости реакции, протон $^{-1}$.

Энергия	Мишень	0°	30°	60°	90°	120°
$E_n > 2$ МэВ	ПП	$4,7 \cdot 10^{-31}$	$3,5 \cdot 10^{-31}$	$2,1 \cdot 10^{-31}$	$1,4 \cdot 10^{-31}$	$1,5 \cdot 10^{-31}$
	АМГ		$3,7 \cdot 10^{-31}$	$1,4 \cdot 10^{-31}$	$1,1 \cdot 10^{-31}$	$8,3 \cdot 10^{-32}$
	С		$3,2 \cdot 10^{-31}$	$7,4 \cdot 10^{-32}$	$4,3 \cdot 10^{-32}$	$3,3 \cdot 10^{-32}$
	Zr		$4,8 \cdot 10^{-31}$	$3,5 \cdot 10^{-31}$	$1,9 \cdot 10^{-31}$	$1,5 \cdot 10^{-31}$
	K_1		$3,0 \cdot 10^{-31}$	$6,6 \cdot 10^{-32}$	$2,5 \cdot 10^{-32}$	$2,6 \cdot 10^{-32}$
	K_2		$3,9 \cdot 10^{-31}$	$1,9 \cdot 10^{-31}$	$1,0 \cdot 10^{-31}$	$1,6 \cdot 10^{-31}$
	$E_n > 6$ МэВ	ПП	$3,6 \cdot 10^{-32}$	$2,7 \cdot 10^{-32}$	$1,4 \cdot 10^{-32}$	$6,9 \cdot 10^{-33}$
АМГ			$1,1 \cdot 10^{-32}$	$4,8 \cdot 10^{-33}$	$2,1 \cdot 10^{-33}$	$3,7 \cdot 10^{-33}$
С			$3,9 \cdot 10^{-32}$	$1,6 \cdot 10^{-32}$	$5,7 \cdot 10^{-33}$	$6,4 \cdot 10^{-33}$
Zr			$2,3 \cdot 10^{-32}$	$1,3 \cdot 10^{-32}$	$5,7 \cdot 10^{-33}$	$7,0 \cdot 10^{-33}$
K_1			$8,7 \cdot 10^{-33}$	$2,4 \cdot 10^{-33}$	$4,8 \cdot 10^{-34}$	$1,4 \cdot 10^{-33}$
K_2			$1,9 \cdot 10^{-32}$	$7,5 \cdot 10^{-33}$	$3,3 \cdot 10^{-33}$	$5,2 \cdot 10^{-33}$
$E_n > 20$ МэВ		ПП	$4,1 \cdot 10^{-32}$	$2,2 \cdot 10^{-32}$	$4,1 \cdot 10^{-33}$	$1,1 \cdot 10^{-33}$
	АМГ		$2,9 \cdot 10^{-32}$	$4,2 \cdot 10^{-33}$	$7,8 \cdot 10^{-34}$	$4,8 \cdot 10^{-34}$
	С		$2,4 \cdot 10^{-32}$	$4,4 \cdot 10^{-33}$	$9,7 \cdot 10^{-34}$	$2,4 \cdot 10^{-34}$
	Zr		$1,1 \cdot 10^{-32}$	$3,5 \cdot 10^{-33}$	$8,0 \cdot 10^{-34}$	$4,4 \cdot 10^{-34}$
	K_1		$1,3 \cdot 10^{-32}$	$2,9 \cdot 10^{-33}$	$6,8 \cdot 10^{-34}$	$3,1 \cdot 10^{-34}$
	K_2		$2,0 \cdot 10^{-32}$	$4,7 \cdot 10^{-33}$	$1,2 \cdot 10^{-33}$	$8,0 \cdot 10^{-34}$

Таблица 3: Угловые распределения нейтронов с $E_n > 0.5$ эВ, нейтрон·см⁻²·протон⁻¹.

Мишень	0°	30°	60°	90°	120°
ПП	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
АМГ	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
С	$5,3 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$
Zr	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
К1	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$
К2	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$

Таблица 4: Интегральные выходы нейтронов в переднюю полусферу, нейтрон/протон.

Мишени	ПП	АМГ	С	Zr	К1	К2
$F_n > 0,5$ эВ	0,22±0,04	0,13±0,02	0,12±0,02	0,23±0,04	0,085±0,02	0,25±0,05

Список литературы

- [1] Ю.М.Адо. — Препринт ИФВЭ 93-24, Протвино, 1993.
- [2] In.: Proceed. Advanced Nuclear Energy Research, Evolution by Accelerators. Mito, Jbaraki, Japan, 1990.
- [3] А.И.Волынчиков, В.Б.Гетманов, Г.И.Крупный и др. — Препринт ИФВЭ 83-86, Серпухов, 1983.
- [4] Е.А.Белогорлов и др. — Препринт ИФВЭ 85-3, Серпухов, 1985.
- [5] Е.А.Белогорлов, В.П.Жигунов. — Препринт ИФВЭ 83-54, Серпухов, 1983.
- [6] А.Г.Алексеев, Ю.В.Быстров, Г.И.Крупный и др. — Препринт ИФВЭ 94-1, Протвино, 1994.