

Сечения ($d, 2n$)-реакций (мбари)

Таблица 2

Энергия дейтонов, Мэв	Eu ¹⁵¹ ($d, 2n$) Gd ¹⁵¹	Eu ¹⁵³ ($d, 2n$) Gd ¹⁵³	Энергия дейтонов, Мэв	Eu ¹⁵¹ ($d, 2n$) Gd ¹⁵¹	Eu ¹⁵³ ($d, 2n$) Gd ¹⁵³
21,2	115	117	13,6	296	305
19,5	148	144	11,8	226	260
18,1	168	187	9,8	128	180
16,7	235	233	7,4	46	68
15,3	300	295	4,1	5	3

изотопов Gd¹⁵¹ и Gd¹⁵³ для толстой мишени. С этой целью были изготовлены из металлического европия фольги толщиной $(38,0 \pm 0,8)$ мг/см². Содержание примесей в исходном материале составляло менее 0,02%. В стопках между фольгами из европия располагались медные фольги толщиной 20 мг/см², которые служили как для определения энергии, так и для предохранения европиевых фольг от спекания. Для определения энергии по медным фольгам использовалась функция возбуждения реакции $\text{Cu}^{65}(d, 2n)\text{Zn}^{65}$, измеренная в работе [8]. Результаты приведены на рис. 2 и 3 для Gd¹⁵¹

и для Gd¹⁵³ соответственно, значения сечений с погрешностью $\pm 20\%$ даны в табл. 2. Ошибка в определении средней энергии частиц составляет $\pm 0,2$ Мэв при $E_{\text{макс}}$ и несколько увеличивается при торможении в связи с некоторой неточностью используемой кривой пробег — энергия.

Поступила в Редакцию 3/VII 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Radioactive Materials. Catalog and Price List, NSEC, Sept., 1965.
2. S. Bjornholm et al. Nucl. Instrum. and Methods, 5, 196 (1959).
3. М. З. Максимов, ЖЭТФ, 38, 127 (1959).
4. Г. Фридендер, Дж. Кеннеди, Дж. Миллер. Ядерная химия и радиохимия. М., «Мир», 1967, стр. 102.
5. П. П. Дмитриев, И. О. Константинов, Н. Н. Краснов. «Атомная энергия», 22, 310 (1967).
6. Е. П. Григорьев и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 23, 786 (1968).
7. Н. К. Гусев, В. П. Машкович, Б. В. Вербцкий. Радиоактивные изотопы как гамма-излучатели. М., Атомиздат, 1964.
8. П. П. Дмитриев, Н. Н. Краснов. «Атомная», 18, 184 (1965).

Радиационная безопасность на ускорителях протонов высокой энергии

В. А. КНЯЗЕВ, М. М. КОМОЧОВ, В. Н. ЛЕБЕДЕВ,
И. В. МЕЩЕРОВА, А. И. МОШАРОВ

УДК 621.3.038.625

Ускорители протонов высокой энергии создают мощное вторичное излучение очень сложного состава. В процессе ядерных реакций кроме высокоэнергетических нуклонов образуются $\pi^{\pm}$ и π^0 -мезоны, $K^{\pm}$ - и K^0 -мезоны и гипероны, энергетический спектр которых простирается от долей электронвольта до энергии, сравнимой с максимальной энергией ускоренных протонов. Сложность состава и спектра, а также импульсный характер излучения создают большие трудности при определении степени радиационной опасности, вследствие чего удается исследовать лишь компоненты, дающие значительный вклад в эквивалентную дозу. Соотношения различных компонентов излучения и пространственное распределение потоков в каждом конкретном случае связаны с конструкцией ускорителя и здания, в котором он размещен, с размерами и конфигурацией специальной защиты. Однако качественная картина примерно одинакова на всех существующих ускорите-

лях протонов высокой энергии. В частности, установлено [1—3], что, как правило, доминирующий вклад в эквивалентную дозу за защитой вносят частицы высоких энергий ($E > 20$ Мэв) и быстрые нейтроны с энергиями от 0,1 до 20 Мэв. Вклад частиц меньших энергий, промежуточных нейтронов и γ -излучения зависит от толщины и типа защиты и может достигать значительных величин. Радиоактивные аэрозоли и наведенная радиоактивность воздуха при достигнутых к настоящему времени интенсивности и энергии ускоренных протонов не вносят заметного вклада в суммарную эквивалентную дозу. Для иллюстрации в табл. 1 приведен примерный вклад основных компонентов смешанного излучения на протонных ускорителях Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) (7 Гэв), ОИЯИ (10 Гэв) [2] и ЦЕРНа (28 Гэв) [1].

При проектировании биологической защиты определяющими факторами являются высоко-

Относительный вклад (%) различных типов излучений в суммарную эквивалентную дозу за защитой протонных синхротронов

Таблица 1

Тип излучения	Диапазон энергии, эв	ИТЭФ [4, 7]	ОИЯИ [1, 2, 8, 9]	ЦЕРН [3, 8]
Нуклоны и π -мезоны	$E \geq 2 \cdot 10^7$	30—60	35—50	2—80
Нейтроны	$2 \cdot 10^7 \geq E \geq 10^5$ $10^5 \geq E \geq 0,5$ $E \leq 0,5$	} 25—60	40—55 5—10 0,5—3	10—80 6—50 1—12
Гамма-кванты и заряженные частицы	$E > 10^4$ $E \geq 10^7$	} 4—15	} 1—10	1—13—70 *

* Величина получена для участка, где работают с мезонами.

энергетичные нуклоны ($E > 100$ Мэв) и μ -мезоны, возникающие при распаде π - и K -мезонов. На основании анализа известных экспериментальных данных установлено, что, если энергия ускоренных протонов не превышает 7—10 Гэв, защита, рассчитанная по нуклонному компоненту, обеспечивает также достаточное ослабление потока μ -мезонов. На ускорителях с энергией протонов выше нескольких десятков Гэв определяющим фактором могут являться μ -мезоны.

При проектировании синхрофазотрона ОИЯИ на 10 Гэв, рассчитанного на ускорение 10^8 — 10^9 протон/сек, предполагалось, что функции основной защиты будет выполнять ядро электромагнита [8, 9]. Поэтому основные стены здания ускорителя были сделаны из кирпича толщиной 0,6 м с большим числом оконных проемов. Увеличение интенсивности пучка ускоренных протонов до $8 \cdot 10^{10}$ протон/цикл при 8 цикл/мин создало условия, при которых на территории, прилегающей к зданию, уровни излучений нередко превышают в несколько раз предельно допустимые уровни (ПДУ) [3]. Это обстоятельство и стремление к дальнейшему повышению интенсивности пучка ускоренных протонов вызывают необходимость сооружения глобальной защиты ускорителя. Такая защита в настоящее время проектируется. На территории, прилегающей к зданию ускорителя, около 40% суммарной эквивалентной дозы составляют нуклоны и π -мезоны высоких энергий, примерно такой же (или несколько больший) вклад — до 50% — дают быстрые нейтроны, остальная часть дозы обусловлена медленными нейтронами и γ -квантами. Такой состав излучения типичен как для участков, с которых «видны» детали

камеры и трактов пучков, подвергающиеся облучению ускоренными протонами, так и для участков за тонкой защитой. В экспериментальных павильонах, куда выводятся пучки вторичных частиц сравнительно низкой интенсивности, уровни излучений составляют десятки и сотни доли ПДУ. Энергетический спектр излучения несколько мягче, так как павильоны размещены за достаточно толстой защитой барьерного типа. Потоки излучений в помещениях, где в основном находятся экспериментаторы и персонал, обслуживающий ускоритель, не превышают уровня естественного фона. Степень облучения 98% персонала, работающего на синхрофазотроне, не превышает 1 бэр/год, около 2% работающих получают за год дозу от 1 до 2,5 бэр/год.

Протонный синхротрон ИТЭФ с энергией ускоренных протонов 7,2 Гэв — первый в Советском Союзе ускоритель с жесткой фокусировкой [10]. При проектировании биологической защиты этого ускорителя предусмотрена глобальная стационарная защита в виде земляной обваловки, которая рассчитана по нейтронному компоненту. К концу 1966 г. интенсивность пучка ускоренных протонов была доведена до 10^{11} протон/цикл при частоте повторения 15 цикл/мин. Применение в качестве инжектора протонов линейного ускорителя на 25 Мэв вместо ранее использовавшегося электростатического генератора на 4 Мэв позволило увеличить интенсивность пучка еще примерно в три раза, что однако, не является пределом.

По степени радиационной опасности все помещения синхротрона ИТЭФ разделены на три зоны: помещения с низкими, средними и высокими уровнями излучения. В последней зоне

Вклад различных видов излучений Таблица 2
в мощность суммарной эквивалентной дозы
(мкбэрад/сек) для основных помещений
ускорителя ИТЭФ*

Помещение	Гамма-излучение	Нейтроны	
		$E < 20 \text{ Мэв}$	$E > 20 \text{ Мэв}$
Большой экспериментальный зал	0,05	0,08—0,9	0,15—0,5
Малый экспериментальный зал . . .	0,05	0,1—0,5	0,1
Пультовая инжектора	0,05	0,08—0,15	—
Помещение инжектора	0,2	0,1—1,5	1,7
Помещение на отметке $-1,5 \text{ м}$. .	0,03—0,8	0,04—4,0	$\leq 2,0$
Перекрытие над главным залом	0,1—6,0	0,25—9,0	0,8—25
На уровне крана в большом экспериментальном зале	0,05	0,4	0,4
Бетонный домик экспериментатора в кольцевом зале	1,0—4,0	6,5—45	6,5—25
Бетонный домик в малом экспериментальном зале	0,08—2,0	0,5—18	5,0—14
Помещение на отметке $+5 \text{ м}$. . .	0,05—0,1	0,04—0,6	0,05—0,6

* Интенсивность пучка 10^{11} протон/цикл.

при работе ускорителя запрещается пребывание персонала. Технологические помещения и экспериментальные залы входят в зону со средними уровнями, где пребывание персонала допускается в течение времени, установленного службой дозиметрии. В табл. 2 приведены экспериментальные данные по вкладу различных компонентов в мощность суммарной эквивалентной дозы для основных помещений ускорителя, полученные при интенсивности ускоренного пучка 10^{11} протон/цикл. Максимальный уровень наведенной радиоактивности деталей и узлов ускорителя на расстоянии около 30 см от мишени после работы ускорителя в течение трех недель со средней интенсивностью 10^{11} протон/цикл составляет 20 мкр/сек. На остальных участках кольцевого ускорителя уровни наведенной активности составляют: а) вблизи квадрупольных линз с нулевым полем на равновесной орбите 2,5—10 мкр/сек, б) вблизи фокусирующих и дефокусирующих магнитов типа «С» менее 2 мкр/сек. В зоне с низкими уровнями

излучения на длительность пребывания персонала не накладывается каких-либо ограничений. Технологические помещения находятся внутри кольца ускорителя и отделены от главного зала бетонными защитными стенами толщиной 1,7 и 2,2 м. В них расположены постоянные рабочие места дежурного и ремонтного персонала. Экспериментальные залы, примыкающие к помещению кольцевого ускорителя, отделены от главного зала разборной бетонной защитой толщиной 6—10 м. Повышение интенсивности ускоренных протонов потребовало устройства верхнего защитного перекрытия над главным кольцевым залом ускорителя в районе экспериментальных залов. Бетонное перекрытие толщиной 1—2 м позволило снизить уровни излучений в 10—15 раз. Сведения о дозах облучения персонала, работающего на ускорителе ИТЭФ, приведены в табл. 3.

Данные об облучении персонала ускорителя ИТЭФ (в процентах) Таблица 3

Доза, бэрад	1961 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.	1965 г.	1966 г.	1967 г.
<i>Обслуживающий персонал</i>							
До 1,0	100	81	81	75	83	63	88
1,1—2,5	—	16	17	21	12	31	11
2,6—56	—	3	2	4	5	6	1
Свыше 5	—	—	—	—	—	—	—
<i>Персонал научных групп</i>							
До 1,0			88	88	95	92	97
1,1—2,5			11	8,5	5,5	8	3
2,6—5,0			1	3,5	0,5	—	—
Свыше 5			—	—	—	—	—

Ускоритель ИТЭФ послужил в некотором роде экспериментальной моделью при сооружении протонного синхротрона Института физики высоких энергий (ИФВЭ) на 70 Гэв вблизи Серпухова [11]. Создание нового протонного ускорителя, запущенного 24 октября 1967 г., выдвинуло ряд совершенно новых проблем в обеспечении радиационной безопасности. Это прежде всего проблема ослабления потоков μ -мезонов, генерируемых в процессе распада π - и K -мезонов высоких энергий. Огромная проникающая способность μ -мезонов, образующихся на этом ускорителе, вынуждает использовать большие объемы защитных материалов, вес которых приблизительно равен

десяти тысячам тонн. В условиях сильной анизотропии, которая характерна для потоков μ -мезонов вообще, к точности расчетов защиты предъявляются очень высокие требования. Из-за значительных градиентов потока μ -мезонов за защитой, обусловленных сложной конфигурацией ярма магнита и защитных сооружений, возникают серьезные трудности при экспериментальной проверке эффективности такой защиты. Временные параметры вторичного излучения, генерируемого протонным синхротроном ИФВЭ, создают дополнительные трудности при детектировании вторичного излучения.

К середине 1968 г. на ускорителе ИФВЭ получена интенсивность ускоренного пучка $2 \cdot 10^{11}$ протон/цикл при частоте повторения 8 цикл/мин. Мощность эквивалентной дозы в экспериментальном зале при этих условиях в зависимости от места измерения колеблется от 0,2 до 3,5 мбэрад/ч.

Радиационная безопасность персонала на протонном синхротроне ИФВЭ, как и на других ускорительных установках, обеспечивается прежде всего комплексом защитных сооружений, включающих в себя земляную обваловку, сборно-разборную защиту в экспериментальном зале и другие защитные сооружения. Важную роль в обеспечении радиационной безопасности играют системы блокировки пучков частиц, звуковой и световой предупредительной сигнализации, приточно-вытяжной вентиляции внутренних помещений ускорителя, комплекс организационно-технических мероприятий и соответствующая организация дозиметрического контроля. Все это вместе взятое позволяет свести к минимуму риск непредусмотренного лучевого поражения персонала.

Толщина земляной обваловки вокруг протонного синхротрона ИФВЭ составляет в среднем 900 г/см^2 . Разборная защита в экспериментальном зале толщиной от 2,2 до 6,0 м скомпонована из модульных крупногабаритных бетонных блоков весом от 10 до 23 т, что позволяет значительно сократить время на монтаж или перестройку защиты. Блоки выполнены из обычного бетона плотностью $2,3\text{--}2,4 \text{ г/см}^3$.

Дозиметрический контроль осуществляется с помощью стационарных систем и переносных детекторов оперативного контроля. Специально разработываемые системы позволяют дистанционно контролировать уровни импульсного многокомпонентного излучения, генерируемого при работе ускорителя, и наведенной радиоактивности вакуумной камеры, магнита и других близко к ним расположенных узлов и устройств уско-

рителя, а также воздуха и аэрозолей в помещении ускорителя.

В практике дозиметрического контроля при определении степени радиационной опасности все компоненты вторичного излучения группируются следующим образом:

- 1) ядерноактивный компонент — излучение, состоящее из сильно взаимодействующих частиц: нуклонов, π - и K -мезонов и гиперонов высоких энергий, отличающихся сравнительно большим и приблизительно одинаковым сечением ядерного взаимодействия в интересующей нас области энергий и, как полагают, сходным характером биологического действия; 2) μ -мезоны и электронно-фотонный компонент, слабо взаимодействующие с веществом, включая и биологическую ткань, и теряющие свою энергию почти исключительно на ионизацию; 3) быстрые нейтроны, генерируемые в процессе ядерных взаимодействий частиц высоких энергий с веществом; 4) промежуточные и медленные нейтроны, образующиеся в результате взаимодействия быстрых нейтронов с окружающей средой; 5) тепловые нейтроны.

Ядерные фрагменты, образующиеся при расщеплениях ядер частицами высоких энергий, непосредственно не регистрируются, хотя сам акт расщепления может учитываться в одной из групп.

Именно такая классификация компонентов обусловлена прежде всего техническими причинами, поскольку ее наиболее просто реализовать на практике. В определенной степени она правомерна и с точки зрения ожидаемого биологического действия компонентов, объединенных в ту или иную группу, хотя количественных данных на этот счет нет. Из-за отсутствия медико-биологических данных в области очень высоких энергий деление двух крупных первых групп на более мелкие хотя и возможно технически, но не имеет смысла в настоящее время.

В качестве детекторов вторичных излучений используются: а) детекторы нейтронов из борсодержащего сцинтиллятора или сцинтиллятора LiI , помещаемых в сферические замедлители различных диаметров; б) детекторы нейтронов из фольги радия или серебра, помещаемой вместе с малогабаритными газоразрядными счетчиками в сферические замедлители различных диаметров. Набор сферических замедлителей позволяет создавать необходимую эффективность детектора для нейтронов с энергией от сотых долей электронвольта до $25\text{--}50 \text{ Мэв}$; в) детекторы нейтронов на основе BF_3 -счетчика в цилиндрических замедлителях диаметром 70,

110 и 270 м. Эти детекторы почти не чувствительны к внешнему фону γ -излучения и к релятивистским заряженным частицам, что важно при измерениях вблизи ускорителя. Набор замедлителей позволяет выделить тепловые, промежуточные и быстрые нейтроны; г) ионизационные камеры разных объемов позволяющие оценить вклад релятивистских заряженных частиц и γ -квантов в суммарную эквивалентную дозу; д) большие пластические сцинтилляторы на основе *p*-терфенила, используемые для детектирования смешанного излучения.

Для регистрации радиоактивного компонента используются сцинтилляционные счетчики на основе ядерной реакции $C^{12}(x, n)C^{11}$. Кроме того, применяются наборы активационных детекторов из индия, золота, фосфора, серы, алюминия в виде пластин, дисков и фольг, ядерных эмульсий и рентгеновских пленок.

Резюмируя изложенное, можно сделать вывод, что развитие техники ускорения заряженных частиц, приведшее к разработке протонных синхрофазотронов на гигантские энергии и большие токи пучков, очень остро ставит проблему радиационной защиты персонала. Наряду с задачами измерения эквивалентной дозы смешанного импульсного излучения, существующего в течение десятков наносекунд и мощностью в десятки рад в импульсе, и оптимального конструирования гигантских защит особенно актуальным в настоящее время является создание научно обоснованных медико-биологи-

ческих нормативов в области высокоэнергетичных излучений. Необходимо в кратчайший срок систематизировать и обобщить все имеющиеся данные по биологическому воздействию этих излучений и существенно расширить работы по экспериментальному излучению биологического воздействия излучений с энергией выше 10 Гэв.

Поступила в Редакцию 17/IX 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. С. Золин и др. Препринт ОИЯИ 2251, Дубна, 1965.
2. В. Н. Лебедев и др. Препринт ОИЯИ Р-2177, Дубна, 1965.
3. J. Baarli, A. Sullivan. Proc. of the USAEC. First Symposium on Accelerator Radiation Dosimetry and Experience CONF-651109 (Health and Safety (TID-4500), 1965, p. 103.
4. Л. Л. Гольдин и др. Proc. V Intern. Conf. on High Energy Accelerated (Frascati, 1965). Roma, CNEN, 1966, p. 85.
5. В. В. Владимировский и др. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963 г.)». М., Атомиздат, 1964.
6. В. В. Владимировский и др. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 5 (1962).
7. В. В. Владимировский и др. «Атомная энергия», 12, 472 (1962).
8. D. Nachtigall. ISR /Int-BT/66-16, 1966.
9. В. Н. Лебедев. «Атомная энергия», 21, 44 (1966).
10. В. И. Векслер и др. «Атомная энергия», 1, № 4, 22 (1956).
11. А. Н. Комаровский. Строительные конструкции ускорителей. М., Атомиздат, 1958.